



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

NÁVRH CHLAZENÍ DVOUKANÁLOVÉHO VÝKONOVÉHO AUDIO ZESILOVAČE POMOCÍ MKO

COOLING OF TWO-CHANNEL AUDIO POWER-AMPLIFIER USING FVM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Němec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Radek Němec

ID: 173715

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Návrh chlazení dvoukanálového výkonového audio zesilovače pomocí MKO

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s modelováním teplotních úloh v systému SolidWorks Flow Simulation. Sestavte a otestujte dvoukanálový výkonový zesilovač typu Leach s potřebnými ochranami, napájecím zdrojem a doplňkovými komponenty. K návrhu chlazení použijte software Solidworks Flow Simulation.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato Bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí dvoukanálového výkonového audio zesilovače typu Leach včetně potřebných doplňkových komponent a následným návrhem chlazení zesilovače pomocí návrhového systému SolidWorks, respektive pomocí nástroje Flow Simulation, jímž tento návrhový systém disponuje. Úvodní kapitoly se věnují teoretickému rozboru problematiky audio zesilovačů, přenosu tepla a popisu systému SolidWorks. Hlavní část práce pak obsahuje návrh a konstrukci zesilovače a dále pak návrh jednotlivých variant chlazení zesilovače, včetně výsledné varianty navrženého chlazení. Poslední částí práce je samotné sestavení zesilovače, včetně zhodnocení ekonomického hlediska jeho výroby.

KLÍČOVÁ SLOVA

Chlazení, konstrukce zesilovače, simulace, SolidWorks, SolidWorks Flow Simulation, The Leach Amp, výkonový zesilovač.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is dealing with the design and construction of two-channel audio Leach type power-amplifier, including the necessary additional components and subsequent design of the amplifier cooling using Flow Simulation tool included in the SolidWorks design system. The opening chapters is about theoretical analysis of audio amplifiers, heat transfer and description of SolidWorks design system. The main part of this thesis contains the design and construction of amplifier and design of each variants of amplifier cooling, including the best variation designed. The last part of the thesis is about assembling the amplifier and evaluation of economic aspects of its production.

KEYWORDS

Cooling, construction of amplifier, simulation, SolidWorks, SolidWorks Flow Simulation, The Leach Amp, power-amplifier.

NĚMEC, R. *Návrh chlazení dvoukanálového výkonového audio zesilovače pomocí MKO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2017. 77 s., 12 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Návrh chlazení dvoukanálového výkonového audio zesilovače pomocí MKO“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 8. června 2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne 8. června 2017

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod.....	9
1 Nízkofrekvenční audio zesilovače	10
1.1 Parametry zesilovačů	11
1.1.1 Výstupní výkon	11
1.1.2 Vstupní impedance	11
1.1.3 Výstupní impedance	11
1.1.4 Kmitočtová a fázová charakteristika	11
1.1.5 Zkreslení	12
1.1.6 Odstup signálu od šumu	12
1.1.7 Výkonová šířka pásma	12
1.1.8 Vstupní citlivost zesilovače	13
1.1.9 Ostatní sledované parametry zesilovačů	13
1.2 Pracovní třídy zesilovačů	13
1.2.1 Třída AB	13
2 Teplo, přesun tepla.....	15
2.1 Přesun tepla kondukcí (vedením)	16
2.2 Přesun tepla konvekci (prouděním)	16
2.3 Přesun tepla radiací (zářením)	18
3 Chlazení elektrických zařízení.....	20
4 CAD systém SolidWorks	22
4.1 SolidWorks Flow Simulation	22
5 Návrh a konstrukce zesilovače.....	24
5.1 Výkonový zesilovač – The Leach Amp	25
5.1.1 Vstupní stupeň	26
5.1.2 Druhý stupeň	27
5.1.3 Výstupní a řídicí stupeň	28
5.1.4 Zpětná vazba	29
5.1.5 Ochranný obvod	30

5.1.6 Konstrukce výkonového zesilovače	31
5.2 Ochrana reproduktorů	33
5.3 Indikátor vybuzení	34
5.4 Řízení ventilátoru	36
5.5 Napájecí zdroj	36
5.5.1 Soft start.....	37
5.5.2 Transformátor	38
5.5.3 Modul napájecího zdroje	38
5.6 Pomocný napájecí zdroj	40
6 Měření parametrů zesilovače	42
6.1 Výkon, příkon a účinnost výkonového zesilovače.....	42
6.2 Kmitočtová charakteristika výkonového zesilovače	44
6.3 Harmonické zkreslení výkonového zesilovače	46
6.4 Ostatní měřené parametry	48
7 Návrh chlazení zesilovače	49
7.1 Geometrický model zesilovače	49
7.2 Ztrátové výkony na jednotlivých částech zesilovače	50
7.3 Nastavení simulací v SW Flow Simulation	54
7.4 Simulace chlazení zesilovače	56
7.4.1 Chlazení bez použití ventilátorů	57
7.4.2 Chlazení s použitím jednoho ventilátoru	59
7.4.3 Chlazení s použitím tří ventilátorů	60
7.4.4 Výsledná varianta chlazení zesilovače	62
8 Sestavení zesilovače	64
8.1 Ekonomické zhodnocení stavby zesilovače	66
9 Závěr.....	68
Literatura	70
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	72
Seznam obrázků	74
Seznam tabulek.....	76

Seznam příloh	77
----------------------------	-----------

Úvod

S audio zesilovači se je možné setkat v každodenním životě v řadě různorodých použití, například jsou součástí televizorů, rádií a řady dalších zařízení. Každý zesilovač se vyznačuje svými určitými specifickými parametry, které ovlivňuje velké množství faktorů od samotného návrhu až po konečné provedení zesilovače. Mezi tyto parametry patří i ztrátový výkon, jenž se v zesilovači promění na teplo a je potřeba jej odvádět pryč ze zesilovače pomocí chlazení. Chlazení je všeobecně důležitou součástí všech, nejen elektrických zařízení, které produkují teplo a bez jehož použití by došlo vlivem vysoké teploty k poškození nebo zničení onoho zařízení. Chlazení zařízení je tedy potřeba pečlivě navrhnout s ohledem na celou skupinu požadavků. Dříve se k návrhu chlazení používali ruční výpočty, ale s postupným rozšiřováním osobních počítačů se stále častěji začali uplatňovat simulační softwary, které celý proces návrhu chlazení značně usnadňují a umožňují určit celou řadu dalších parametrů chlazení, například teplotní pole či proudění vzduchu uvnitř zařízení.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a zkonstruovat dvoukanálový výkonový audio zesilovač se všemi potřebnými komponenty, kdy výkonový zesilovač bude typu Leach, který v kategorii Hi-Fi patří mezi kvalitní výkonové zesilovače s velmi dobrými parametry. Dalším neméně důležitým cílem této práce je navrhnout pomocí softwaru SolidWorks Flow Simulation chlazení tohoto zesilovače. Výsledkem práce by pak měl být kompletně sestavený audio zesilovač umístěný v přístrojové skříni včetně navrženého chlazení. Celá práce pak bude doplněna podklady z jeho realizace.

1 Nízkofrekvenční audio zesilovače

Nízkofrekvenční audio zesilovače jsou elektrotechnická zařízení, jejichž úkolem je napětově nebo výkonově zesilovat vstupní signál. Podle toho se nízkofrekvenční audio zesilovače rozdělují na zesilovače napětí, což jsou typicky předzesilovače či budicí zesilovače a na výkonové zesilovače. Hlavní úlohou zesilovačů napětí je napětově zesílit, případně upravit, vstupní signál na požadovanou napětovou úroveň. Výkonové zesilovače poté takto upravený signál dále napětově a proudově zesílí na konečnou úroveň, použitelnou k buzení reproduktorů. Nízkofrekvenčními audio zesilovači jsou tyto zesilovače nazývány proto, že jsou v oblasti audiotechniky používány pro zesilování signálů o nízké frekvenci. Jedná se o signály o frekvencích přibližně od 16 Hz do 20 kHz, což je frekvenční pásmo, které je slyšitelné lidským uchem, tzv. audio pásmo. [1]

V dnešní době jsou většinou ve spotřební elektronice nízkofrekvenční audio zesilovače realizovány formou integrovaných obvodů, pro větší výkony, hlavně v profesionálním použití a v tzv. High-End audiotechnice, pak jako tranzistorové. V poslední řadě, i když již velmi málo používané, jsou zesilovače elektronkové. Každá z těchto konstrukcí nízkofrekvenčních audio zesilovačů je charakteristická svými typickými vlastnostmi, představujícími určité výhody i nevýhody, které ovlivňují účel použití zesilovače. [1]

1.1 Parametry zesilovačů

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, každý a to nejenom nízkofrekvenční audio zesilovač je charakterizován svými dobrými i špatnými vlastnostmi respektive parametry. V dalších podkapitolách jsou uvedeny a popsány některé nejvýznamnější parametry sledované u nízkofrekvenčních audio zesilovačů. Při psaní následujících podkapitol bylo částečně čerpáno z [1].

1.1.1 Výstupní výkon

Výstupní výkon zesilovačů není udáván úplně jednotně. Ve většině případů je uváděn jmenovitý (sinusový) výstupní výkon zesilovače. Jmenovitý výkon zesilovače je výkon, který je zesilovač trvale schopný dodávat do zátěže. Měří se při buzení zesilovače sinusovým signálem o kmitočtu 1 kHz, kterým je zesilovač buzen minimálně po dobu 10 minut, při dodržení určitého maximálního zkreslení výstupního signálu zesilovače. Dále pak je někdy uváděn výkon hudební, nebo výkon RMS. [1][2]

Jmenovitý výstupní výkon zesilovače se vypočte pomocí následující rovnice. [2]

$$P_{JMEN} = \frac{U_{VYST}^2}{Z_Z} \text{ [W]} \quad (1)$$

Kde U_{VYST} [V] je výstupní napětí na zatěžovací impedanci Z_Z [Ω], kterou je zesilovač zatížen a P_{JMEN} [W] pak představuje jmenovitý výstupní výkon zesilovače.

1.1.2 Vstupní impedance

Vstupní impedanci je označována impedance, kterou je zatížen zdroj signálu, jenž jej na vstup zesilovače přivádí. Charakter vstupní impedance je u nízkofrekvenčních audio zesilovačů převážně reálný, proto se místo pojmu impedance udává většinou vstupní odpor zesilovače. Její velikost se spolu s vývojem nízkofrekvenčních zesilovačů snížila až na současnou úroveň, kdy většinou dosahuje hodnot kolem desítek k Ω . To hlavně z toho důvodu, že zesilovače s velkou vstupní impedancí jsou více citlivé na brum a rušivé kmitočty. [1][3]

1.1.3 Výstupní impedance

Velikost výstupní impedance se u dnešních nízkofrekvenčních zesilovačů pohybuje v řádu jednotek Ω . Dále je závislá na frekvenci, protože s frekvencí její velikost roste. K optimálnímu výkonovému přizpůsobení dojde v případě, že výstupní impedance zesilovače (zdroje) je stejná jako impedance zátěže. [1]

1.1.4 Kmitočtová a fázová charakteristika

Nízkofrekvenční audio zesilovače musí být schopny věrně, s co možná největším vyloučením jakéhokoliv zkreslení, zesílit vstupní signál o uchem slyšitelné frekvenci ve frekvenčním (kmitočtovém) rozsahu minimálně od 40 Hz do 16 kHz. Kmitočtová charakteristika udává rozmezí frekvencí vstupního signálu, které je zesilovač schopen zesílit o stejnou velikost. Kmitočtová charakteristika musí být v tomto rozsahu

tzv. rovná, bez větších odchylek. V Hi-Fi třídě jsou povoleny odchylky maximálně $\pm 1,5$ dB od ideálně rovné kmitočtové charakteristiky. Fázová charakteristika pak udává posun fáze mezi vstupním a výstupním signálem zesilovače v závislosti na frekvenci signálu. [1] Napěťové zesílení, potřebné pro stanovení kmitočtové charakteristiky, se vypočítá pomocí následující rovnice. [1][4]

$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{VYST}}{U_{VST}} \text{ [dB]} \quad (2)$$

Kde je U_{VYST} [V] výstupní napětí zesilovače, U_{VST} [V] napětí na vstupu zesilovače a A_U [dB] je napěťové zesílení.

1.1.5 Zkreslení

Zkreslení výstupního signálu jdoucího ze zesilovače se dělí jednak na lineární zkreslení, při kterém nedochází k věrnému podání amplitudy vstupního signálu na výstupu zesilovače, frekvence signálu však zůstává nezměněna. Dalším zkreslením signálu zesilovačem je nelineární zkreslení, jehož ukazatelem je činitel harmonického zkreslení K , někdy také značený jako THD , vyjádřený v [%]. Nelineární zkreslení způsobuje špatné nastavení pracovních bodů tranzistorů, jejich nelineární charakteristika, nebo například přebuzením zesilovače, čímž vzniknou na výstupu zesilovače nové frekvenční složky signálu (násobky původního signálu), které ve vstupním signálu nebyly obsaženy. Posledním udávaným zkreslením způsobeným zesilovačem je zkreslení intermodulační, které je také nelineární, při němž dochází k tomu, že se na výstupu zesilovače objeví frekvenční složky signálů s frekvencí o součtu nebo rozdílu původních vstupních signálů. [1][2] Již zmíněný činitel harmonického zkreslení K (THD) se vypočítá podle následujícího vztahu. [1][2]

$$K = THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

Kde je U_1 [V] efektivní hodnota výstupního zesíleného signálu zesilovače a U_2 , U_3 a U_n [V] jsou efektivní hodnoty vyšších harmonických složek výstupního signálu vytvářené zesilovačem.

1.1.6 Odstup signálu od šumu

Odstup signálu od šumu vyjadřuje poměr mezi velikostí zesíleného signálu a velikostí rušivého signálu, typicky je vyjadřován v [dB]. Odstup signálu od šumu lze vypočítat použitím rovnice (2). Výkonové zesilovače musí mít odstup signálu od šumu alespoň 60 dB, napěťové zesilovače (předzesilovače) pak alespoň 50 dB. [1]

1.1.7 Výkonová šířka pásma

Je to kmitočtový rozsah, v jehož rozmezí se může jmenovitý (sinusový) výstupní výkon zesilovače snížit na polovinu, tedy o 3 dB. Současně však musí být dodržena určitá maximální hodnota činitele harmonického zkreslení K (THD). Ta nesmí u koncových

zesilovačů a předzesilovačů překročit hodnotu 0,7 %. [1][2] Výstupní jmenovitý výkon zesilovače uvedený v [dB] se vypočítá podle následujícího vztahu. [4]

$$A_p = 10 \cdot \log \frac{P_{VYST}}{P_{VST}} \text{ [dB]} \quad (4)$$

Kde A_p je výstupní jmenovitý výkon zesilovače v [dB], P_{VYST} [W] je výstupní jmenovitý výkon zesilovače a P_{VST} [W] je vstupní jmenovitý výkon zesilovače.

1.1.8 Vstupní citlivost zesilovače

Vstupní citlivost udává poměr mezi napětím vstupního signálu jdoucího do zesilovače a napětím výstupního signálu jdoucího ze zesilovače. Dalším sledovaným parametrem je taktéž hodnota maximálního napětí na vstupu zesilovače, kterou je schopen zesilovač zpracovat bez zkreslení. Při překročení této hodnoty by došlo k ořezání výstupního signálu, protože velikost napětí výstupního signálu je limitována napájecím napětím zesilovače, a tím ke zkreslení výstupního signálu. [1]

1.1.9 Ostatní sledované parametry zesilovačů

Dalších sledovaných parametrů nízkofrekvenčních zesilovačů je samozřejmě mnoho, pro přehled je zde dále vyjmenováno pár dalších z nich. [1][2]

- Dynamika
- Činitel tlumení
- Vnitřní impedance
- Rychlost přeběhu (Slew Rate)
- Přeslechy
- Výstupní napětí zesilovače
- Účinnost zesilovače
- Stejnoseměrný offset

1.2 Pracovní třídy zesilovačů

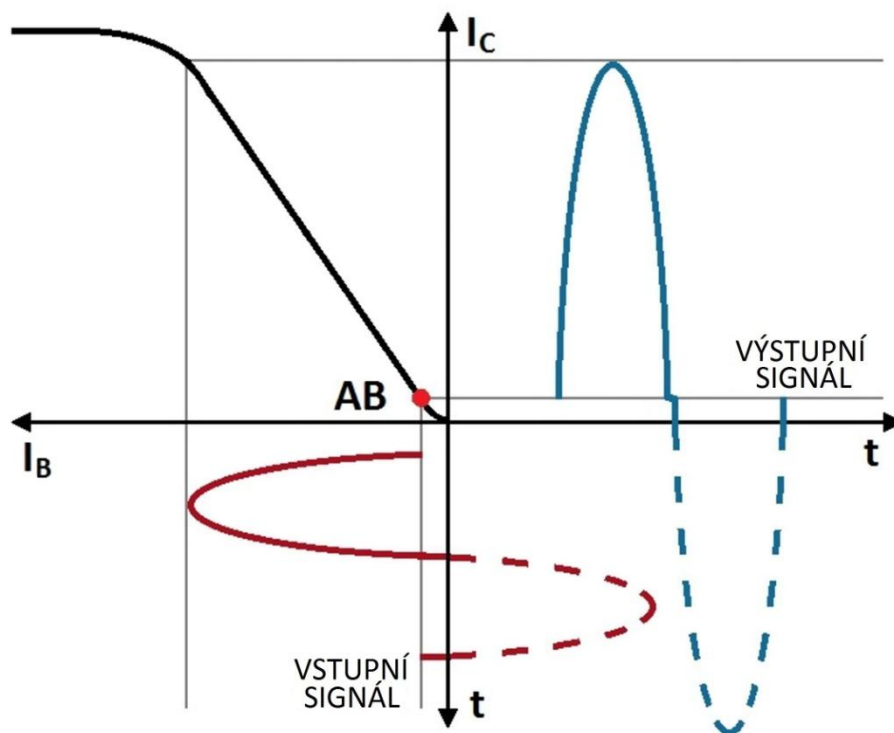
Nízkofrekvenční audio zesilovače se podle polohy pracovního bodu tranzistorů, nebo principu na jakém pracují, dělí do takzvaných tříd. Podle tříd se dále nízkofrekvenční zesilovače dělí na lineární, kdy tranzistory pracují v lineárním režimu a spínané, kde se naopak tranzistory chovají jako spínače pracující v oblasti saturace. Typickými zástupci tříd lineárních zesilovačů jsou třídy A, B a AB, asi nejčastěji používaná třída spínaných zesilovačů je třída D. Vzhledem k tomu, že zadaný výkonový zesilovač typu Leach pracuje právě ve třídě AB, je následující podkapitola zaměřena právě na tuto třídu. [5]

1.2.1 Třída AB

Jak již bylo v předchozí kapitole zmíněno, třídami lineárních zesilovačů jsou třídy A, B a AB. Výhodou zesilovačů pracujících ve třídě A je velmi malé zkreslení výstupního

signálu, naopak jejích bezesporu největší nevýhodou je malá účinnost, která se pohybuje přibližně do 10 % a s tím i velké nároky na chlazení. Naopak zesilovače pracující ve třídě B mají díky své konstrukci účinnost až 65 %, nevýhodou však je nutnost použití dvou tranzistorů, jeden pro zesilování kladné a druhý pro záporné amplitudy vstupního signálu a s tím spojené značné zkreslení výstupního signálu, tzv. přechodové zkreslení. [6][7]

Třída zesilovačů AB do jisté míry kombinuje výhody třídy A i třídy B. Zesilovače v této třídě mají vyšší účinnost než ty, které pracují ve třídě A, a zároveň mají i menší zkreslení výstupního signálu, než zesilovače pracující ve třídě B. Třída zesilovačů AB je v současnosti nejrozšířenější třídou lineárních zesilovačů, používanou v řadě aplikací od spotřební elektroniky až po profesionální audio sestavy. Konstrukčně vychází zesilovače třídy AB ze třídy B, rozdíl je však v nastavení klidového pracovního bodu tranzistorů, kdy ve třídě AB je klidový pracovní bod nastaven do začátku lineární části převodní charakteristiky, viz Obr. 1. To je docíleno nastavením malého klidového proudu, který prochází tranzistory ve chvíli, kdy není na zesilovač přiveden žádný vstupní signál. Tím se částečně eliminuje přechodové zkreslení, typické pro zesilovače třídy B, na druhou stranu však dochází k zhoršení účinnosti. Teoretická účinnost zesilovačů pracujících ve třídě AB je až 78 %, praktická však jen přibližně do 60%. [6][7]



Obr. 1: Nastavení pracovního bodu u zesilovačů třídy AB

2 Teplo, přesun tepla

Teplo a s ním spojená teplota je v mnoha nejenom technických odvětvích velmi obsáhlou problematikou. V mnoha případech je žádoucí dosažení určité teploty dané látky nebo předmětu a to ať už vyšší, stejné anebo nižší, než jakou má okolní prostředí. Tato bakalářská práce se zabývá návrhem chlazení dvoukanálového výkonového audio zesilovače pomocí MKO, v tomto případě je tudíž cílem zabezpečit odvod tepla vznikajícího přeměnou elektrické energie a docílit tak teploty, kterou nebudou jednotlivé součástky příliš teplotně namáhány.

Teplo Q je energie, která je přesunuta mezi dvěma předměty, jenž má každý jinou teplotou, přičemž dochází ke změně jejich vnitřní energie. Vnitřní energie předmětu (systému) představuje nahodilý pohyb molekul a atomů daného předmětu spojený se srážkami mezi nimi. Jejich rychlost pohybu a množství srážek jsou úměrné teplotě daného tělesa. Tyto molekuly a atomy jsou charakteristické svou kinetickou a potenciální energií. Z pohledu předmětu, kterému byla energie dodána, je teplo kladné, avšak z pohledu předmětu, jemuž byla energie odebrána, je teplo záporné. Jednotkou tepla je joule [J]. [8] Věda, která se zabývá problematikou tepla a s ním spjatými tepelnými jevy, se nazývá Termodynamika. Teplo Q , jenž daný předmět přijal, nebo mu bylo odebráno, se vypočítá následující rovnicí. [8][9]

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \text{ [J]} \quad (5)$$

Kde v rovnici Q [J] je množství přijatého nebo odebraného tepla z daného předmětu, m [kg] je hmotnost, c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je měrná tepelná kapacita materiálu, ze kterého je předmět vyroben a ΔT [K] je rozdíl mezi počáteční a konečnou teplotou předmětu.

Zatímco teplo je veličina dějová, teplota spolu s vnitřní energií předmětu jsou veličiny stavové. Teplota patří mezi základní veličiny soustavy SI, ve které je její velikost udávána na termodynamické Kelvinově teplotní stupnici s jednotkou kelvin [K]. Teplota o velikosti 0 K je tzv. absolutní nula, tedy nejnižší hodnota dosažitelné teploty, při níž je vnitřní energie předmětu rovna nule. Tato teplota je však prakticky nedosažitelná. [8][9] Další asi nejčastěji používanou teplotní stupnicí je stupnice Celsiova, s jednotkou stupeň Celsia [$^{\circ}\text{C}$]. Počátek Celsiovi stupnice 0°C je určen pomocí trojného bodu vody. Teplota 0°C odpovídá teplotě 273,16 K, velikost jednoho stupně Celsia [$^{\circ}\text{C}$] pak odpovídá velikosti jednoho kelvinu [K]. Z toho vyplývá, že počátek Celsiovy stupnice je vůči Kelvinově stupnici posunut o 273,16 K. Další, zejména v USA používanou, teplotní stupnicí je stupnice Fahrenheitova s jednotkou stupeň Fahrenheita [$^{\circ}\text{F}$]. [8][9]

Jak už bylo zmíněno v předchozích odstavcích, při styku dvou těles, nebo styku tělesa s okolním prostředím s rozdílnou teplotou, dochází k přesunu energie, tedy tepla Q . Celkem existují tři způsoby, kterými k přesunu tepla dochází. Jedná se o přesun tepla kondukcí (vedením), přesun tepla konvekcí (prouděním) a přesun tepla radiací

(zářením). Ve všech případech je vždy teplo přesouváno zároveň všemi třemi způsoby, avšak existují situace, při kterých je jeden z uvedených způsobů přesunu tepla dominantní. [9]

2.1 Přesun tepla kondukcí (vedením)

Přesun tepla kondukcí probíhá v tuhých látkách a taktéž v kapalinách, z oblastí s vyšší teplotou do oblastí s teplotou nižší. Principiálně se vzrůstající teplotou v daném místě tělesa roste i velikost kmitů a množství srážek mezi částicemi tvořící dané těleso. Tím že do sebe částice narážejí, dochází k přenosu kmitů z jedné částice na druhou a taktéž i části energie ve formě tepla Q . Při přesunu tepla kondukcí se jednotlivé částice předmětu nepohybují, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Teplo Q , které se šíří tělesem, v určitých vzdálenostech od svého zdroje, respektive části tělesa odkud se teplo šíří, vytváří místa se stejnou teplotou, tzv. izotermické plochy. Teplo procházející těmito plochami představuje tepelný tok P . [8][9]

Hustotu tohoto tepelného toku vyjadřuje první Fourierův zákon. Podle něj jsou hustota tepelného toku q [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] a záporný gradient teploty $\text{grad } \vartheta$ [$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$] mezi sebou navzájem úměrné. Gradient teploty pak vyjadřuje nárůst tepoty tělesa v každém jeho směru. Hustota tepelného toku dále ještě závisí na součiniteli tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. [9]

$$q = -\lambda \cdot \text{grad} \vartheta = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (6)$$

Tepelný tok P [W] je násobkem plochy S [m^2], kterou hustota tepelného toku q [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] prochází. [9]

$$P = q \cdot S [\text{W}] \quad (7)$$

Materiál tělesa však průchodu tepelného toku P [W] a s tím spojenému přenosu tepla Q [J] brání svým tepelným odporem R [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]. Ten závisí na tloušťce oblasti tělesa d [m], kterou tepelný tok P prochází a na součiniteli tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. [8][9]

$$R = \frac{d}{\lambda} [\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}] \quad (8)$$

2.2 Přesun tepla konvekcí (prouděním)

Dalším způsobem přesunu tepla je konvekce (proudění), která probíhá v plynných nebo kapalných látkách, jež jsou v kontaktu s látkami pevnými. Při konvekci současně probíhá přesun tepla vedením mezi pevnou látkou a plynem nebo kapalinou, nacházející se v malé vzdálenosti od pevné látky, a prouděním samotného plynu nebo kapaliny. Velikost podílu jednotlivých druhů přesunu tepla na přesunu celkovém je závislá na složení, vlastnostech a rychlosti proudící kapalně nebo plynné látky. Zároveň však platí, že s rostoucí rychlostí proudící látky, klesá podíl přesunu tepla pomocí

kondukce (vedení). Zatím co při přesunu tepla kondukcí nedochází k pohybu částic, při přesunu tepla konvekcí se částice (plynu nebo kapaliny) pohybují. [8][9]

Přesun tepla konvekcí se dělí na dva druhy. Prvním druhem je přirozená konvekce, kdy je vrstva kapaliny nebo plynu ležící v bezprostřední blízkosti pevného tělesa ohřívána, takže se snižuje její hustota a zvětšuje objem. Zároveň však tato vrstva plynu nebo kapaliny začíná být lehčí, takže se pod ní vlivem gravitačního pole začne nasouvat okolní neohřátá kapalina nebo plyn. Druhým druhem přesunu tepla konvekcí je konvekce nucená, která je do jisté míry stejná jako konvekce přirozená, avšak pohyb kapaliny nebo plynu je způsoben působením dalšího vlivu, v plynech například ventilátorem při chlazení elektrických zařízení, nebo v kapalinách například oběhovým čerpadlem v ústředním topení. Při přesunu tepla konvekcí jsou většinou zastoupeny oba její druhy, avšak s rostoucí rychlostí a klesajícími gradienty proudící kapaliny nebo plynu roste vliv přesunu tepla nucenou konvekcí. [9]

Dalším rozdělením konvekce (proudění) je podle způsobu pohybu částic proudící látky. Zde se rozlišuje proudění laminární a turbulentní. Při laminárním proudění se jednotlivé částice pohybují vůči sobě rovnoběžně, u turbulentního proudění se jednotlivé částice mezi sebou mísí ve formě vírů. To jestli je dané proudění laminární nebo turbulentní lze stanovit pomocí Reynoldsova čísla Re [-]. [9][10]

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (9)$$

Reynoldsovo číslo Re [-] závisí na kinematické viskozitě ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}$], rychlosti proudění látky v_s [$\text{m} \cdot \text{s}$] a na průměru kanálu kterým daná látka proudí d [m]. Mezní hodnota Reynoldsova čísla, při níž se laminární proudění mění na turbulentní a naopak, není pro všechny proudící látky stejná, protože závisí na vlastnostech daného proudícího plynu nebo kapaliny. Navíc existuje přechodová oblast, ve které jsou přítomny oba způsoby pohybu částic proudící látky, tudíž ani tato mezní hodnota Reynoldsova čísla není ve skutečnosti pevně daná. Obecně lze konstatovat, že pro malé hodnoty Reynoldsova čísla je proudění laminární, zatím co pro velké je proudění turbulentní. [9]

Důležitým parametrem při přesunu tepla konvekcí je součinitel přestupu tepla α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$]. Ten udává míru přesunu tepla mezi pevnou látkou a kapalinou nebo plynem, a s jeho velikostí roste i míra přesunu tepla. [9]

Přesun tepla konvekcí popisují, stejně jako proudění tekutin, Navier-Stokesovovy rovnice, které v sobě obsahují zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Řada simulačních programů při simulaci přenosu tepla pomocí konvekce funguje na principu řešení Navier-Stokesových rovnic a na základě jejich výpočtu je schopna určit míru konvekce, ohřívání a ochlazování těles a další simulací požadované parametry. [9][11]

Navier-Stokesova rovnice obsahující zákon zachování hmotnosti. [11]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (10)$$

Navier-Stokesova rovnice obsahující zákon zachování hybnosti. [11]

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

Navier-Stokesova rovnice obsahující zákon zachování energie. [11]

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (v_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i v_i + Q_H \quad (12)$$

V rovnicích (10) až (12) značí ρ [kg·m³] hustotu proudící látky, v [m·s⁻¹] je pak rychlost proudění látky, S_i [N] je součet vnějších sil, který se v některých případech skládá pouze s tíhové síly Fg [N]. Dále pak v rovnicích P [Pa] je tlak, t [s] je čas, Q_H [J] je přijaté nebo odevzdané teplo, τ_{ij} [-] je viskózní tenzor smykového tření, τ_{ij}^R [Pa] je tenzor Reynoldsova napětí, q_i [W·m⁻²] je difuzní tepelný tok a H [J] je entalpie, jenž se vypočítá pomocí následující rovnice (13). [11]

$$H = h + \frac{v^2}{2} \quad (13)$$

Kde v rovnici (13) je h [J·kg] statická entalpie. Viskózní tenzor smykového tření τ_{ij} se vypočítá z koeficientu dynamické viskozity μ [N·s·m⁻²], rychlosti proudění látky v [m·s⁻¹] a Kroneckerovy funkce δ_{ij} [-] následujícím vztahem. [11]

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (14)$$

2.3 Přesun tepla radiací (zářením)

Poslední možností přesunu tepla je přesun tepla radiací (zářením), někdy též nazýván sáláním. Přenos tepla zde probíhá prostřednictvím elektromagnetického vlnění, tzv. tepelným zářením, v hmotném i nehmotném prostředí. [8] V zahříváném tělese dochází spolu s rostoucí teplotou ke změnám jeho vnitřní energie a tím začíná těleso vydávat elektromagnetické vlny do okolního prostoru. Ty pak může pohltit jiné těleso, čímž dojde ke zvýšení jeho vnitřní energie, tedy tepla. Všechny elektromagnetické vlny, které dopadly na jiné těleso, však nejsou pohlceny, některé z nich se také odrazí anebo tělesem projdou. To, jaké množství elektromagnetických vln předmět pohltí, závisí na barvě, struktuře a složení jeho povrchu. V této souvislosti byla zavedena veličina emisivita ε [-], která může nabývat hodnot od 0 do 1. Pro ideálně černé těleso, tedy těleso, které by všechny na něj dopadající elektromagnetické vlny pohltilo, je emisivita $\varepsilon = 1$, naopak pro ideálně bílé těleso, od kterého se všechny elektromagnetické vlny odrazí, je pak emisivita $\varepsilon = 0$. [8][9]

Každé těleso vydává nebo pohlcuje jiné množství elektromagnetických vln a s nimi souvisejícího tepla, což představuje výkon P [W]. Ten závisí na ploše povrchu tělesa S [m²], teplotě T [K] povrchu tělesa a již zmíněné emisivitě ε [-]. Výkon vyzařujícího tělesa se vypočítá pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona, viz následující rovnice. [8]

$$P = \varepsilon \sigma S T^4 \text{ [W]} \quad (15)$$

V rovnici (15) pak σ [W·m⁻²·K⁻⁴] značí Stefanovu-Boltzmanovu konstantu.

Při chlazení dvoukanálového výkonového audio zesilovače navrženého a sestaveného v této bakalářské práci je díky relativně malému rozdílu teplot mezi chladičem, kterým jsou výkonové součástky chlazeny a okolním vzduchem, zcela dominantní přesun tepla kondukcí a konvekcí. Proto při návrhu chlazení tohoto zesilovače byl vliv přesunu tepla pomocí radiace (záření) zanedbán.

3 Chlazení elektrických zařízení

Každé elektrické zařízení, jež spotřebovává elektrickou energii, je zahříváno v důsledku výkonových ztrát na tomto zařízení. V mnoha případech jsou výkonové ztráty na zařízení, respektive jeho součástkách, natolik malé, že dochází k zcela zanedbatelnému zahřátí, nebo teplota součástek není natolik kritická, aby došlo k jejich poškození. Na druhou stranu je spousta zařízení, na jejichž součástkách jsou natolik velké ztrátové výkony, že se bez přídavného chlazení neobejdou. Použitý typ jejich chlazení pak závisí na řadě faktorů, z nichž nejvýznamnějšími jsou například samotný ztrátový výkon na dané součástce, možné rozměry chlazení, či v dnešní době tolik důležitá cena navrženého chlazení. V zásadě se rozlišují dva základní typy chlazení a to pasivní a aktivní.

Pasivní chlazení tvoří kovový chladič, k němuž jsou přichyceny chlazené součástky. Vyrobený je nejčastěji z hliníku, někdy též z mědi anebo je chladič tvořen kombinací těchto materiálů (například měděná základna s hliníkovými žebry). Pro větší stykovou plochu s okolním vzduchem je chladič opatřen již zmiňovanými žebry. Samotné chlazení zde probíhá přirozenou konvekcí. Výhodou tohoto řešení je absolutní bezhlučnost, naopak nevýhodou jsou mnohdy velké rozměry při chlazení velkých ztrátových výkonů a s nimi související hmotnost a cena. [12]

Druhým typem je chlazení aktivní. To se skládá z ventilátoru a dále pak většinou z pasivního chladiče s přichycenými součástkami, jenž je ochlazován proudem vzduchu, který na něj ventilátor fouká. Chlazení v tomto případě probíhá pomocí nucené konvekce. Výhodou tohoto řešení jsou menší rozměry při chlazení velkých ztrátových výkonů, než v případě pouze pasivního chlazení a vyšší účinnost chlazení. Nevýhodou tohoto řešení je však hluk, jenž vydává použitý ventilátor. Příklad aktivního chlazení, které je v tomto případě použito pro chlazení procesoru v počítači, je na Obr. 2. [12]



Obr. 2: Příklad aktivního chlazení

V některých případech není použit pasivní chladič a tak jsou součástky chlazeny pouze proudem vzduchu pomocí ventilátoru. Účinnost tohoto chlazení je pak nižší a závislá na stykové ploše součástek s okolím. [12]

Mezi další druhy chlazení patří vodní chlazení, které je zvláště vhodné pro chlazení velkých ztrátových výkonů. S jeho použitím se lze nejčastěji setkat například u výkonných počítačových sestav. [12]

4 CAD systém SolidWorks

Pro vytvoření 3D modelu a následnou simulaci teploty na jednotlivých částech zesilovače a proudění vzduchu uvnitř zesilovače byl použit CAD systém SolidWorks ve verzi Standart. Systém SolidWorks od společnosti Dassault Systèmes SolidWorks patří do skupiny strojírenských CAD systému, v dnešní době patří mezi ty vůbec nejúspěšnější na českém trhu a jeho podíl, co se týká počtu prodaných licencí, nadále roste. Mezi jeho konkurenty patří Autodesk Inventor, Solid Edge a množství dalších CAD systémů. Systém SolidWorks je parametrický 3D modelář, který umožňuje plošné i objemové modelování, automatické generování výrobních výkresů a celou řadu dalších nástrojů, které se odvíjí od jednotlivých verzí CAD systému SolidWorks. V současné době jsou nabízeny tři základní verze, respektive balíčky SolidWorks. Základním balíčkem je SolidWorks Standart, který obsahuje ucelené řešení pro CAD, dalšími produktovými balíčky pak jsou SolidWorks Professional a SolidWorks Premium, kdy každý obsahuje vše co předchází balíček a k tomu další nové nástroje a funkce. [13][14]

Výhody systému SolidWorks jsou především:

- Snadné a přehledné ovládání
- Kompletní česká lokalizace
- Generování rozsáhlých výkresů a možnosti práce s velkými sestavami
- Široká paleta CAD nástrojů
- Výborná kompatibilita dokumentů mezi jednotlivými SolidWorks produkty

Dalšími možnostmi CAD systému SolidWorks je balíček SolidWorks Electrical, který umožňuje navrhování elektrických rozvodů, a dále pak SolidWorks Inspection pro kontrolu kvality či SolidWorks Sustainability pro podporu ekologického návrhu. [13]

4.1 SolidWorks Flow Simulation

SolidWorks Flow Simulation je nástroj, jenž je volitelnou součástí systému SolidWorks a byl použit k simulaci rozvržení teploty na jednotlivých částech zesilovače a proudění ohřátého vzduchu uvnitř zesilovače. SolidWorks Flow Simulation je určen k všeobecnému použití v řadě průmyslových odvětví umožňující simulaci sdílení tepla a dynamiky tekutin. [15]

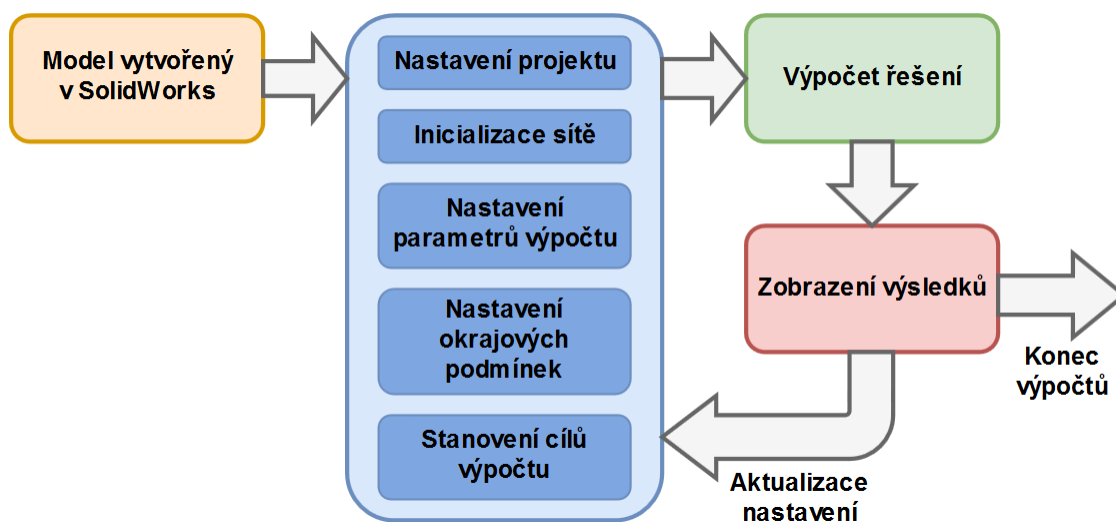
Nástroj SolidWorks Flow Simulation slouží například:

- Ke zjišťování přenosu tepla zářením, prouděním a vedením
- K analýze proudění tepla uvnitř i vně zařízení
- K analýze přechodových dějů
- K analýze rotačních zařízení

Pro nástroj SolidWorks Flow Simulation jsou dále k dispozici rozšíření HVAC a Electronics Cooling, které jej dále obohacují o řadu dalších funkcí. [15]

K výpočtu parametrů zadaných objektů používá SolidWorks Flow Simulation metodu konečných objemů (MKO). Ta, jak již z názvu může vyplývat, spočívá v rozdělení simulované oblasti na soustavu elementů s konečnými objemy, jednotlivé elementy se nikterak nepřekrývají. Dříve se používala síť strukturovaná s elementy ve tvaru čtyřúhelníků, v současnosti se však většinou používá nestrukturovaná síť, kdy jednotlivé elementy mají tvar kvádru, čtyřstěnu a prizmatického nebo pyramidového prvku. Výhodou nestrukturované sítě je především větší přesnost výpočtu a snadnější změna její hustoty. Jednotlivé elementy jsou poté popsány soustavami rovnic a řešeny každý zvlášť. [9] SolidWorks Flow Simulation při výpočtech používá Navier-Stokesovy rovnice uvedené v kapitole 2.2 jako rovnice (10) až (12) a první Fourierův zákon, viz rovnice (6) v kapitole 2.1. [11]

Samotná simulace požadovaných objektů v SolidWorks Flow Simulation, ale i obecně v simulačních programech, které umožňují tepelné simulace, se skládá z kroků uvedených v diagramu na Obr. 3.



Obr. 3: Diagram jednotlivých kroků simulace v SolidWorks Flow Simulation [9]

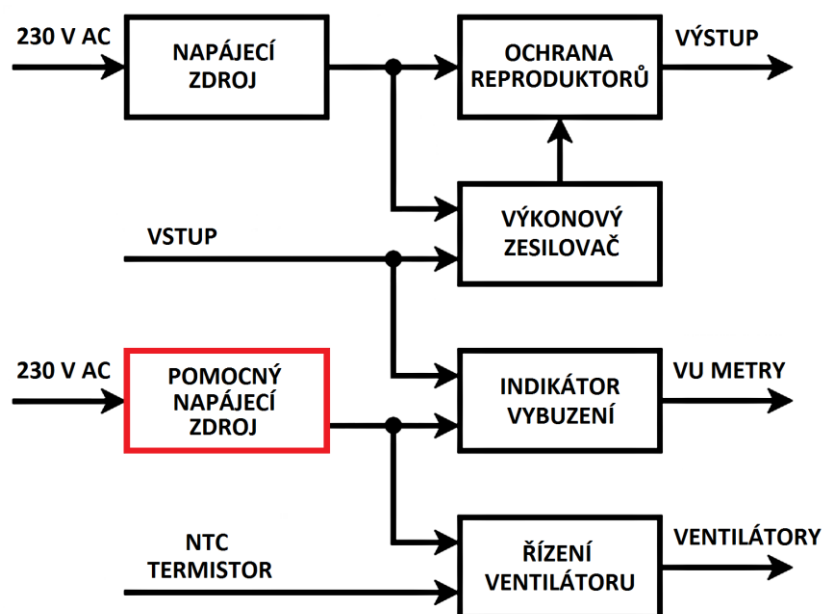
Pro simulaci je nejprve vytvořen model simulovaného objektu, ten je exportován do modulu Flow Simulation návrhového systému SolidWorks. Zde je provedeno nastavení fyzikálních vlastností simulovaného objektu, samotných parametrů simulace, okolních podmínek a řady dalších parametrů, viz modrý rámeček na Obr. 3. Poté následuje samotná simulace s následným zobrazením výsledků získaných simulací, zde je možné podle dosažených výsledků změnit nastavení simulace, a simulaci provést znovu. [9]

5 Návrh a konstrukce zesilovače

Cílem první části této bakalářské práce je navrhnout a sestavit dvoukanálový výkonový audio zesilovač s napájecím zdrojem a dalšími komponenty, který bude obsahovat výkonový zesilovač The Leach Amp, jenž byl navržen americkým profesorem W. Marschallem Leachem [16]. Zesilovače typu Leach jsou mezi lidmi zabývající se audio technikou velmi známé. Vynikají především malým zkreslením a velmi kvalitním zvukovým přednesem, čímž se řadí až do High-End Hi-Fi třídy. Tomu přispívá i fakt, že pracují ve třídě zesilovačů AB. Dále pak jde o léty prověřenou, jednoduchou a spolehlivou konstrukci. I napříč tomu, že byla celé konstrukce zesilovače Leach navržena ze součástkové základny používané v USA, je většina součástek dostupných i v tuzemsku.

Zadaný výkonový zesilovač typu Leach navíc dovoluje použití zamýšlených dvoukanálových reproduktorů, každý s impedancí $8\ \Omega$ a s maximálním trvalým výkonem 100 W, při použití transformátorů s výstupním střídavým napětím $2 \times 29\text{ V}$, které byly při návrhu zesilovače k dispozici. Odpadla tedy nutnost pořízení transformátoru s jiným výstupním napětím nebo jiných reproduktorů. Více však je popsáno v kapitole 6.1.

Vzhledem k tomu, že se jedná o dvoukanálový zesilovač, byly použity dva výkonové zesilovače typu Leach, každý na samostatné desce plošných spojů. Stejně tak byly použity dva napájecí zdroje a další doplňkové komponenty, viz blokové schéma navrženého zesilovače na Obr. 4, kde všechny části zesilovače značené černě byly použity po dvou kusech, pouze pomocný napájecí zdroj, na Obr. 4 značený červeně, byl použit pouze jeden.



Obr. 4: Blokové schéma navrženého zesilovače.

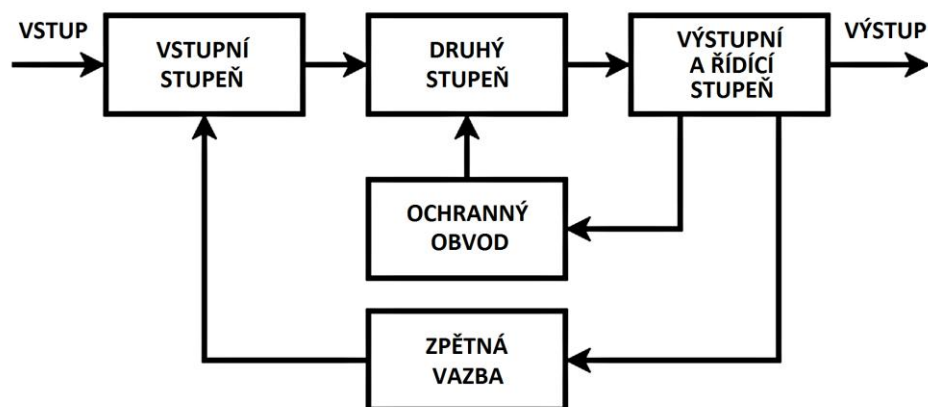
Samotný výkonový zesilovač typu Leach již obsahuje ochranu proti zkratu a napěťovým špičkám na výstupu zesilovače, avšak v případě jeho poruchy by se na jeho výstupu mohlo objevit stejnosměrné napětí, které by poškodilo připojené reproduktory. Pro tento účel byl každý výkonový zesilovač vybaven externí ochranou reproduktoru, která v případě jeho poruchy, ochrání reproduktor proti tomuto napětí jeho odpojením od výkonového zesilovače. Druhou funkcí ochrany reproduktor je opožděné připojení reproduktoru k výkonovému zesilovači, čímž se zabrání nepříjemnému lupnutí v reproduktorech vznikající při zapnutí zesilovače. Mezi doplňkové komponenty patří pro každý kanál zesilovače jeden indikátor vybuzení doplněný ručičkovým VU metrem a řízení ventilátoru.

Další důležitou součástí zesilovače je napájecí zdroj, kterým je celý zesilovač napájen. Jak bylo při měření parametrů výkonového zesilovače Leach v kapitole 6.1 zjištěno, příkon jednoho výkonového zesilovače dosahoval při 4 Ω zátěži přibližně 220 W. Aby byl celý zesilovač patřičně dimenzován i na tuto možnou zátěž, bylo tedy nutné použít dva transformátory, každý s výkonem 300 VA. Z toho důvodu byl celý napájecí zdroj realizován jako dva samostatné napájecí zdroje, každý pro jeden výkonový zesilovač.

Poslední součástí zesilovače je pomocný napájecí zdroj. Ten musel být použit z toho důvodu, protože řízení ventilátoru a indikátor vybuzení potřebují mnohem nižší napájecí napětí, než výkonový zesilovač. Navíc snížení napájecího napětí výkonového zesilovače na požadovanou velikost by bylo značně neefektivní z pohledu ztrát vzniklých jeho stabilizací. Pomocný napájecí zdroj je však v celém zesilovači použit pouze jeden a jsou pomocí něj napájeny obě řízení ventilátoru a oba indikátory vybuzení.

5.1 Výkonový zesilovač – The Leach Amp

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, jako výkonový zesilovač byl použit zesilovač The Leach Amp navržený profesorem W. Marschallem Leachem. Modifikací zapojení tohoto výkonového zesilovače existuje celá řada, byla však zvolena původní varianta podle originálního návrhu autora [16]. Autor výkonového zesilovače profesor W. Marschall Leach, kromě jeho obecných parametrů, podrobnější parametry neuvádí. Proto jsou naměřené parametry výkonového zesilovače typu Leach zkonstruovaného v této bakalářské práci uvedeny v kapitole 5. Jednotlivé části, ze kterých se výkonový zesilovač typu Leach skládá, jsou vyobrazeny na blokovém schématu na Obr. 5. Kompletní schéma zapojení výkonového zesilovače překreslené z [17] je pak uvedeno v příloze A.1.

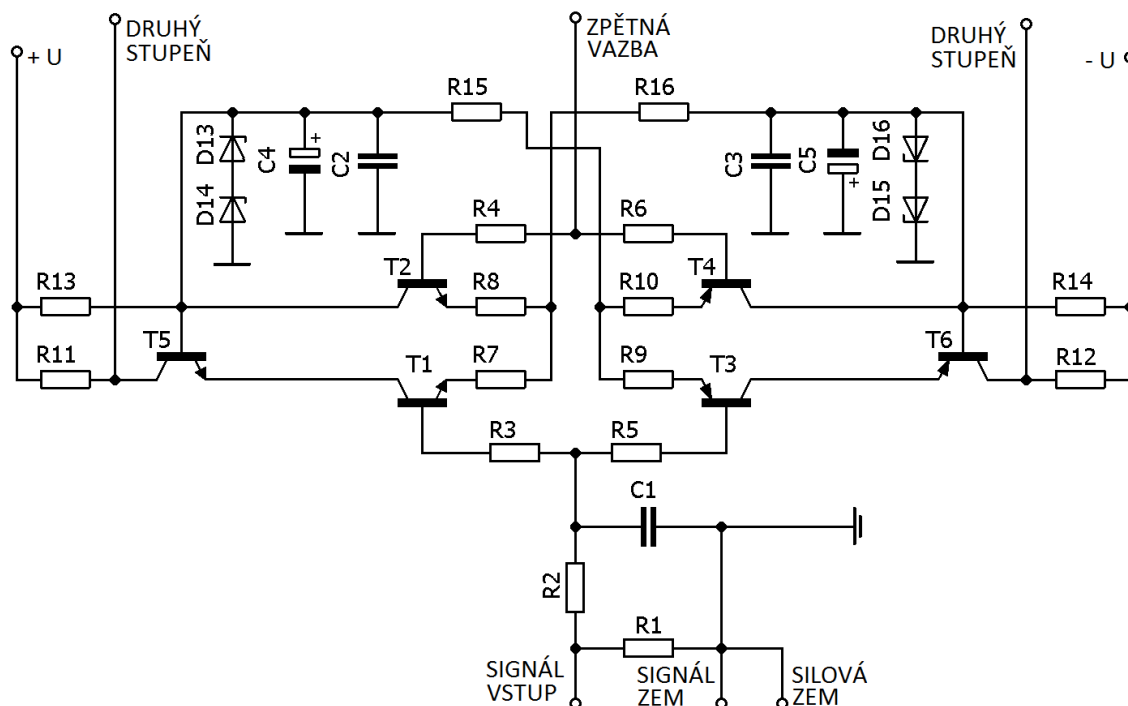


Obr. 5: Blokové schéma jednotlivých částí zesilovače The Leach Amp.

Celý výkonový zesilovač The Leach Amp se dělí na vstupní stupeň, druhý stupeň, řídicí a výstupní stupeň, zpětnou vazbu a ochranný obvod. Následující popis jednotlivých částí výkonového zesilovače The Leach Amp je přeložen z [16].

5.1.1 Vstupní stupeň

Vstupní stupeň, vyobrazený na Obr. 6, je zapojen jako kaskádový rozdílový zesilovač. Kondenzátor C1 a rezistor R2 tvoří frekvenční filtr – dolní propust, kterou jsou odfiltrovány složky vstupního signálu o frekvenci vyšší než 200 kHz. Tím je zabráněno zesilování signálů o rádiových frekvencích. Vstupní odpor výkonového zesilovače tvoří 20 kΩ rezistor R1. Komplementární rozdílové zesilovače jsou tvořeny tranzistory T1 až T4.



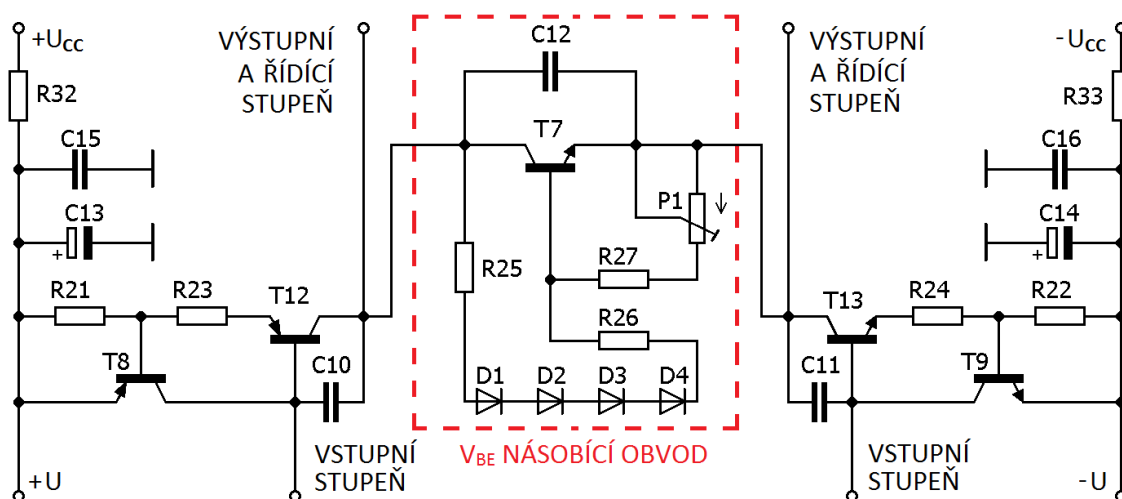
Obr. 6: Schéma zapojení vstupního stupně

Od vstupního napětí, přivedeného na báze tranzistorů T1 a T3, je odčítáno napětí ze zpětné vazby, přivedené na báze tranzistorů T2 a T4, čímž se vytváří chybový proud, kterým jsou řízeny tranzistory T5 a T6. Napětíové zesílení obou rozdílových zesilovačů je přibližně 2, tedy asi 6 dB. Tranzistory T5 a T6, jenž jsou zapojeny jako zesilovače s kaskádovou společnou bází, přivádí chybový proud na rezistory R11 a R12. Na nich pak vzniká napětí, kterým je řízen další stupeň zesilovače. Další funkcí tranzistorů T5 a T6 je snížení napětí na tranzistorech v diferenčním zesilovači T1 až T4 přibližně na 18 V.

Zenerovy stabilizační diody D13 až D16 zajišťují konstantní napětí na diferenčních zesilovačích a nastavují jejich klidový proud. Použity jsou vždy dvě 20 V Zenerovy diody zapojené v sérii kvůli toleranci jednotlivých diod. Kondenzátory C2 až C5 jsou tzv. oddělovací kondenzátory. Díky rezistorům R15 a R16 je nastaven klidový proud protékající každým rozdílovým zesilovačem na hodnotu 3,25 mA. Tímto klidovým proudem a rezistory R7 až R10 je nastaveno rozdílové transkonduktanční zesílení rozdílových zesilovačů na hodnotu přibližně 1,6 mA/V. Diferenční zesilovače tedy obsahují tzv. odporové obvody konečného klidového proudu, jejichž výhodou je především malý šum. Další důležitou funkcí těchto rezistorů je frekvenční kompenzace zesilovače, snížení zesílení a tím zvýšení stability zesilovače a v neposlední řadě taktéž zlepšení dynamického rozsahu a linearitu zesilovače.

5.1.2 Druhý stupeň

Druhý stupeň má za úkol nastavit stejnosměrné předpětí na svém výstupu a taktéž napětíové zesílit výstupní napětí z rozdílových zesilovačů ve vstupním stupni. Schéma zapojení druhého stupně je uvedeno na Obr. 7.



Obr. 7: Schéma zapojení druhého stupně

Výstupní napětí ze vstupního stupně je přiveden na báze tranzistorů T12 a T13, které jsou komplementárně zapojeny jako zesilovače se společným emitorem a poskytují tak velké napětíové zesílení. Odporů R21 až R24 jsou nastaveny klidové proudy procházející tranzistory T12 a T13 na přibližně 4,2 mA a tím jejich

transkonduktance na 2,5 mA/V. Střídavá složka napětí na obou výstupech z rozdílových zesilovačů je ve fázi. Pokud obě napětí vzrostou, poklesne proud procházející tranzistorem T12 a vzroste proud procházející tranzistorem T13. Současně s tím dojde i k poklesu napětí na obou výstupech z druhého stupně a naopak. Velká impedance rezistorů připojených na kolektory tranzistorů T13 a T14 má za následek, že i napěťové zesílení druhého stupně je velké. Kompenzační kondenzátory C10 a C11 jsou tzv. zpožďovací kondenzátory, které zabraňují oscilacím zesilovače. Rezistory R32 a R33 a kondenzátory C13 až C16 odstraňují zvlnění napájecího napětí připojeného na vstupní a druhý stupeň.

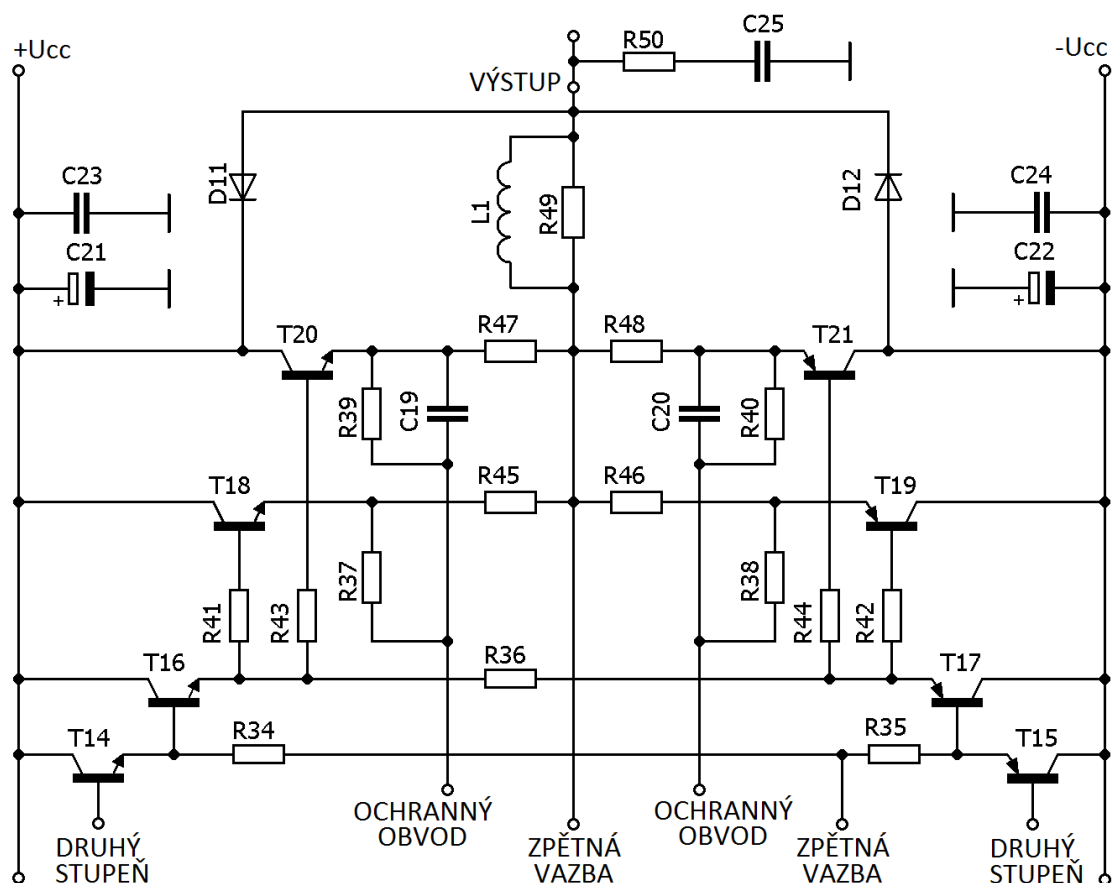
Část obvodu na Obr. 7 ohraničená přerušovanou červenou čarou je tzv. V_{BE} násobící obvod. Tranzistor T7 představuje regulátor stejnosměrného napětí, který nastavuje klidové proudy ve výstupním stupni a tím posouvá pracovní bod koncových tranzistorů tak, aby pracovaly ve třídě AB. Velikost napětí, které nastaví tranzistor T7, lze upravit trimrem P1. Diody D1 až D4 umístěné na chladiči zesilovače tvoří zápornou teplotní zpětnou vazbu. Tyto diody zajišťují, snížení napětí na tranzistoru T7 ve chvíli, kdy se zvýší teplota chladiče, čímž se upraví klidový proud koncovými tranzistory. Kondenzátor C12 zabraňuje oscilacím způsobených zpětnou vazbou a zlepšuje regulaci napětí na tranzistoru T7. Tranzistory T8 a T9 jsou součástí ochrany zesilovače, proto jejich funkce bude vysvětlena v kapitole 5.1.5.

5.1.3 Výstupní a řídicí stupeň

Výstupní stupeň výkonového zesilovače The Leach Amp je zapojen ve třístupňovém Darlingtonově komplementárním zapojení se společným kolektorem. Schéma výstupního a řídicího stupně je na Obr. 8. Tranzistory T18 až T21 jsou koncové tranzistory pracující ve třídě AB, které regulují výkon dodávaný do zátěže v podobě reproduktorů. Tyto tranzistory jsou umístěny na chladiči mimo desku plošných spojů výkonového zesilovače. Pro zesílení kladné a pro zesílení záporné půlvlny jsou vždy určeny dva tranzistory zapojeny paralelně (T18 s T20 a T19 s T21), čímž je dodaný proud do zátěže z výstupního stupně dvojnásobný. Proudové zesílení výstupního stupně potřebné pro buzení reproduktorů je velmi vysoké, avšak napěťové je rovno přibližně 1. Pokud není zesilovač buzen, dohromady všemi koncovými tranzistory teče klidový proud přibližně 100 mA, tedy 50 mA každým tranzistorem, čímž se minimalizuje přechodné zkreslení na výstupu zesilovače.

Tranzistory T14 až T17, jsou tzv. řídicí stupeň. Jejich úkolem je řídit proud do bází koncových tranzistorů. Tranzistory T14 až T17 pracují ve třídě A z toho důvodu, aby se zajistila jejich nízká výstupní impedance, což má za následek hladké otevírání a zavírání koncových tranzistorů a minimalizace přechodového zkreslení.

Klidové proudy všemi uvedenými tranzistory jsou nastaveny V_{BE} násobícím obvodem. Úkolem rezistorů R41 až R44 je potlačovat parazitní oscilace, jež mohou vzniknout v koncovém stupni.



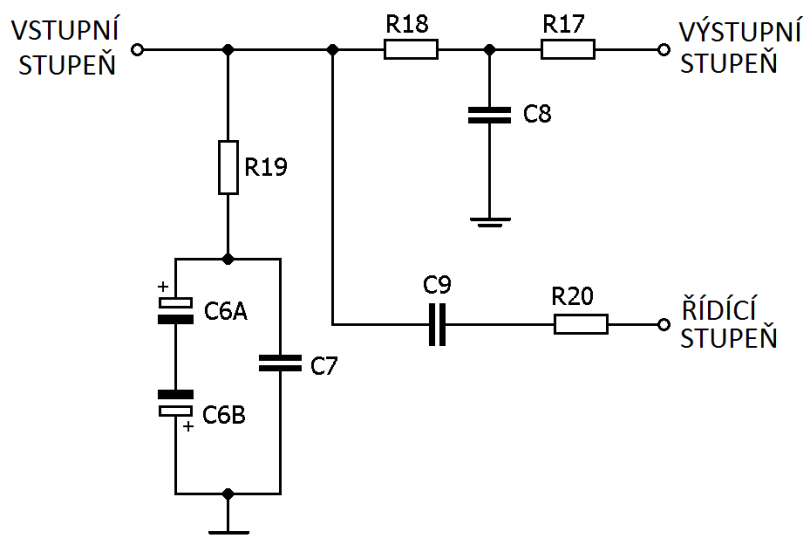
Obr. 8: Schéma zapojení výstupního a řídicího stupně

Rezistory R45 až R48 zajišťují rovnoměrné rozdělení proudů procházejícími koncovými tranzistory a dále také slouží k snímání kolektorových proudů pro ochranný obvod. Rezistory R49, R50, cívka L1 a kondenzátor C25 potlačují parazitní kmity, které mohou být způsobeny kapacitou reproduktoru. Sériové spojení rezistoru R50 a kondenzátoru C25 se nazývá Boucherotův člen. Kondenzátory C21 až C24 oddělují napájecí zdroj od obvodů zesilovače. Funkce rezistorů R37 až R40, diod D11 a D12 a kondenzátorů C19 a C20 je rovněž popsána v kapitole ochranný obvod.

5.1.4 Zpětná vazba

Schéma zapojení zpětné vazby, kterou obsahuje zesilovač The Leach Amp, je uvedeno na Obr. 9. Pro frekvence signálu odpovídajícího audio frekvencím se kondenzátory C6A, C6B a C7 jeví jako zkrat, naopak kondenzátory C8 a C9 jako rozpojený obvod. Zpětná vazba je v tomto případě zavedena z výstupu na reproduktor a přes rezistory R17 a R18 připojená na invertující vstup rozdílových zesilovačů. Zesílení celého zesilovače je dáno použitými rezistory ve zpětné vazbě, jeho velikost je přibližně 21, tedy 26,4 dB, přesná hodnota zesílení je však ovlivněna tolerancí rezistorů.

Pokud frekvence vstupního signálu překročí kmitočet 150 kHz, kondenzátory C8 a C9 se pro tento signál začnou jevit jako zkrat a zpětná vazba je tedy zavedena z řídicího stupně zesilovače.

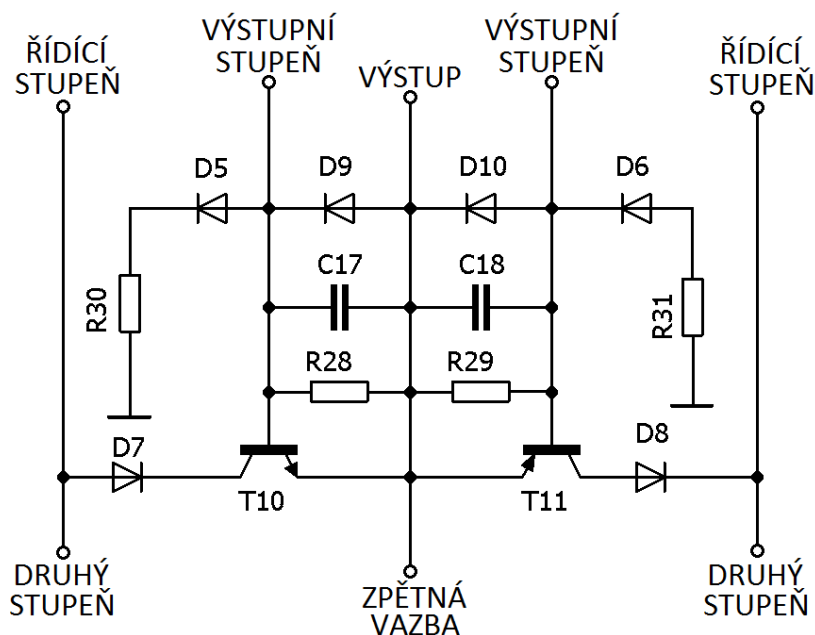


Obr. 9: Schéma zapojení zpětné vazby

Naopak pokud bude frekvence vstupního signálu nižší, než 1 Hz budou se kondenzátory C6A, C6B a C7 chovat jako rozpojený obvod. V tuto chvíli tak má zesilovač zavedenou 100 % stejnosměrnou zpětnou vazbu a jeho zesílení je 1. Hlavní úlohou zpětné vazby je jednak zajištění stability při vysokofrekvenčních oscilacích, které mohou vzniknout kvůli kapacitě zátěže a dále zlepšení stability klidových proudů při frekvencích vstupního signálu nižších než 1 Hz.

5.1.5 Ochranný obvod

Ochranný obvod zesilovače The Leach Amp sloužící k ochraně proti zkratu na výstupu zesilovače je na Obr. 10. Diody D11 a D12 chrání koncové tranzistory proti napěťovým špičkám, rezistory R37 až R40 a kondenzátory C19 a C20, které jsou součástí ochrany proti zkratu na výstupu zesilovače, jsou na Obr. 8 v kapitole 5.1.3.



Obr. 10: Schéma zapojení ochranného obvodu výkonového zesilovače Leach

Tranzistory T10 a T11 snímají napětí na rezistorech R45 až R48, viz schéma zapojení výstupního a řídicího stupně na Obr. 8. Normálně jsou tyto tranzistory zavřené, avšak nadměrným proudem tekoucím rezistory R45 až R48 se začnou otevírat a odvádět proud z bází tranzistorů T14 a T15 v řídicím stupni směrem do zátěže, čímž se omezí maximální proud protékající koncovými tranzistory T18 až T21. To však má za následek zvýšení proudu tekoucího tranzistory T12 a T13 z kterýchž jsou na báze tranzistorů T14 a T15 přiváděny. Aby se tomu zabránilo, jsou pro tento účel určeny tranzistory T8 a T9, které omezí bázové proudy do tranzistorů T12 a T13.

Pomocí rezistorů R28 až R31 a R37 až R40, viz Obr. 8, se nastavuje prahová hodnota proudu koncovými tranzistory, při níž začíná ochranný obvod reagovat. Kondenzátory C17 a C18 jsou určeny k zabránění aktivace ochranného obvodu při rychlých přechodech tranzistorů z uzavřeného do otevřeného stavu a naopak. Kvůli odstranění parazitních oscilací v obvodu jsou použity kondenzátory C19 a C20.

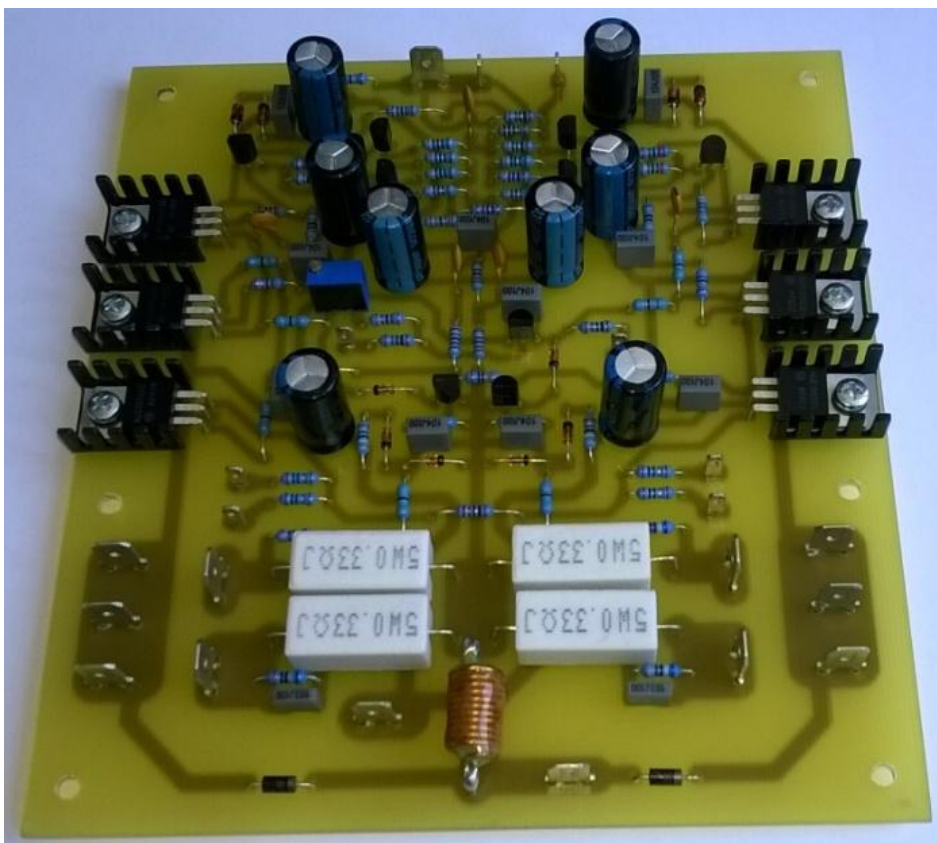
Diody D11 a D12, které jsou uvedeny na Obr. 8, chrání koncové tranzistory T18 až T21 před napěťovými špičkami, které mohou být naindukovány na výstupu induktivní zátěží.

5.1.6 Konstrukce výkonového zesilovače

Při konstrukci výkonového zesilovače bylo provedeno několik úprav oproti původnímu návrhu. Největší změnou bylo zvolení adekvátní náhrady za autorem [16] použité tranzistory 2N3440 a 2N3415 na pozicích jako T13 a T14 respektive T12 a T15, viz Obr. 7 a Obr. 8, protože nebyly na českém trhu dostupné. Jako náhrada za zmíněné tranzistory byly použity tranzistory MJE15032 jako T13 a T14 a MJE15033 jako T12 a T15. Všechny tranzistory v pouzdrech TO220, tedy T12 až T17, byly z důvodu zlepšení jejich chlazení opatřeny hliníkovými chladiči, přes které byly přišroubovány k desce plošného spoje.

Jako kondenzátory C6A a C6B byly zvoleny elektrolytické kondenzátory o kapacitě 330 μF na maximální napětí 63 V podle [17], protože místo nich nebylo možné zakoupit jeden bipolární kondenzátor. Všechny ostatní součástky jsou použity stejné jako v originálním návrhu v [16].

Pro připojení veškerých součástek, které jsou umístěny mimo desku plošného spoje, napájecího napětí a vstupů a výstupů zesilovače byly použity faston konektory. Celá deska plošných spojů výkonového zesilovače typu Leach je navržena jako jednovrstvá deska z materiálu FR4 o rozměrech 150 x 140 mm. Šířky vodivých cest byly oproti původnímu návrhu v [16] zvětšeny, stejně tak i pájecí plošky kvůli snadnějšímu pájení a celá deska plošných spojů byla upravena s ohledem na provedené změny. Celá již osazená deska plošného spoje výkonového zesilovače Leach je na fotografii, viz Obr. 11.



Obr. 11: Sestavený výkonový zesilovač

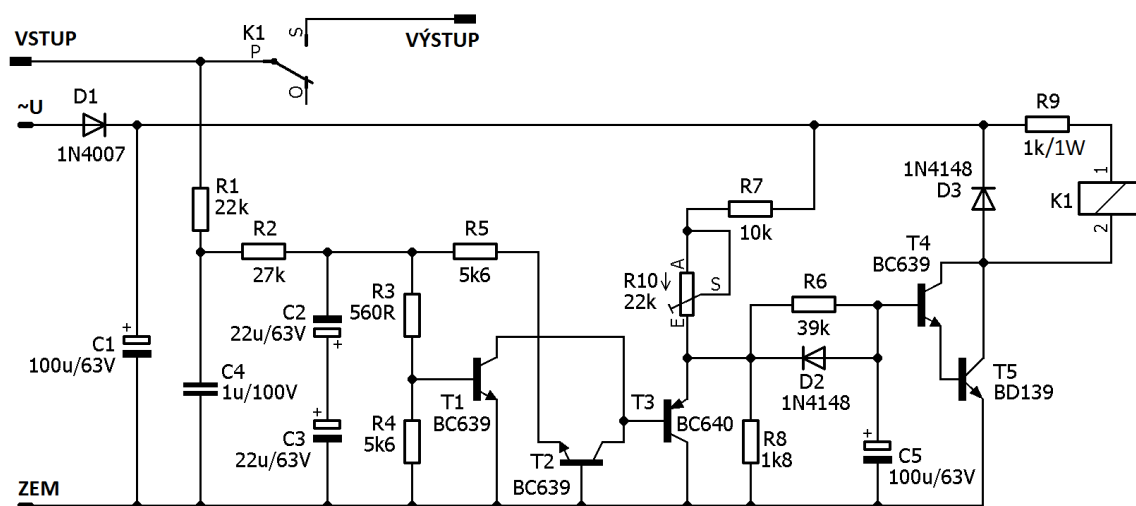
Koncové tranzistory T18 až T21 uvedené na Obr. 8 jsou umístěny na hliníkovém chladiči s rozměry 250 x 90 x 25 mm mimo desku plošných spojů výkonového zesilovače, stejně tak diody D1 až D4. Rezistor R50 a kondenzátor C25, tvořící tzv. Boucherotův člen, jsou umístěny přímo na výstupních svorkách zesilovače, k nimž bude připojen reproduktor.

Cívka L1 je namotaná 11 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 1 mm kolem rezistoru R49 a připájená k jeho vývodům. Protože se při testování výkonového zesilovače ukázalo, že cívka při vysokých výstupních výkonech píská, byly jednotlivé závitů k sobě zalepeny epoxidovým lepidlem. Výkonová ztráta na cívce L1 i rezistoru R49 je i při maximálním výstupním výkonu zesilovače minimální, tudíž tato úprava nemá výrazný vliv na jejich chlazení.

Podklady pro výrobu a osazení desky plošného spoje výkonového zesilovače typu Leach jsou uvedeny v příloze A.

5.2 Ochrana reproduktorů

Ochrana reproduktorů slouží k odstranění lupnutí v reproduktorech při zapnutí zesilovače tím, že opožděně připojí reproduktory k zesilovači až ve chvíli, kdy odezní přechodové jevy v zesilovači, které toto lupnutí způsobují. Druhou funkcí ochrany reproduktorů je odpojení reproduktorů ve chvíli, kdy se při poruše výkonového zesilovače na jeho výstupu objeví stejnosměrné napětí a tím se zabrání jejich poškození. Schéma ochrany reproduktorů, přejaté a upravené z [18] je na Obr. 12.



Obr. 12: Schéma zapojení ochrany reproduktorů [18]

Ochrana reproduktorů funguje následovně. Na svorku VSTUP je připojen výstup z výkonového zesilovače, na svorku VÝSTUP je pak připojen reproduktor. Při zapnutí zesilovače se začne nabíjet přes rezistory R6, R7 a trimr R10 kondenzátor C5. Tím jak se kondenzátor C5 nabíjí, roste na něm napětí, čímž se pomalu otevírá dvojice tranzistorů T4 a T5. Na tranzistoru T5 pak pomalu klesá napětí, naopak na cívce relé K1 napětí roste. K sepnutí relé dojde ve chvíli, kdy bude na cívce dostatečné napětí pro jeho sepnutí. Po sepnutí relé, jsou reproduktory připojeny k výkonovému zesilovači. Doba, než dojde k připojení reproduktorů k výkonovému zesilovači, respektive časová konstanta nabíjení kondenzátoru C5, je nastavitelná trimrem R10. Pokud se objeví na výstupu zesilovače stejnosměrné napětí, nabije se kondenzátor C2 nebo C3 a zároveň dojde k otevření příslušného tranzistoru T1 nebo T2. To má za následek otevření tranzistoru T3, čímž se vybije kondenzátor C5 a relé se rozepe. Celá ochrana je napájena přímo z jednoho sekundárního vinutí použitého transformátoru. [18]

Při testování ochrany reproduktorů sestavené na nepájivém poli se ukázalo že, již při malém střídavém výstupním napětí zesilovače ochrana rozepíná relé. To by šlo sice vyřešit pouze zvýšením hodnoty rezistoru R2, mělo by to však za následek i rapidní zvýšení velikosti stejnosměrného napětí, které by muselo být na výstupu zesilovače, aby došlo k rozepnutí relé K1. Byla proto zvýšena kapacita kondenzátorů C2 a C3 na 22 μ F a dále pak vytvořen z rezistoru R1 a kondenzátoru C4 další RC článek na vstupu ochrany reproduktorů. Tím je zabezpečeno, že ochrana odpojí reproduktory

již při stejnosměrném napětí o velikosti přibližně $\pm 2,5$ V. Velikost rezistoru R1 a kondenzátoru C4, viz Obr. 12, byla stanovena při testování ochrany.

Dále byla upravena velikost rezistoru R9 s ohledem na použité relé RELRAS2415 a střídavé napájecí napětí $U_{STR.} = 29$ V. Jeho velikost byla stanovena následujícími výpočty. Velikost napájecího napětí po usměrnění U_{ef} [V], pokud se nebere v úvahu úbytek napětí na usměrňovací diodě, se rovná jeho maximální hodnotě.

$$U = U_{STR.} \cdot \sqrt{2} = 29 \cdot \sqrt{2} = 41 \text{ V} \quad (16)$$

Použité relé RELRAS2415 [19] má tyto parametry:

- Odpor cívky $R_{CV} = 1600 \Omega$
- Nominální proud cívky $I_{CV} = 15 \text{ mA}$
- Nominální napětí relé $U_{RE} = 24 \text{ V}$
- Minimální napětí pro sepnutí $U_{MIN} = 18 \text{ V}$
- Maximální dovolené napětí na cívce $U_{MAX} = 31,2 \text{ V}$

Výpočet velikosti rezistoru R9.

$$R_9 = \frac{U - U_{RE}}{I_{CV}} = \frac{41 - 24}{15 \cdot 10^{-3}} = 1133 \Omega \quad (17)$$

Výkonové zatížení P_{R9} [W] rezistoru R9.

$$P_{R9} = (U - U_{RE}) \cdot I_{CV} = (41 - 24) \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 0,25 \text{ W} \quad (18)$$

Velikost rezistoru R9 byla s ohledem na jeho výpočty, zanedbání úbytku na usměrňovací diodě a parametry relé zvolena $1 \text{ k}\Omega$, jeho výkonové zatížení pak 1 W . Podklady pro výrobu desky plošných spojů ochrany reproduktorů jsou uvedeny v příloze B.

5.3 Indikátor vybuzení

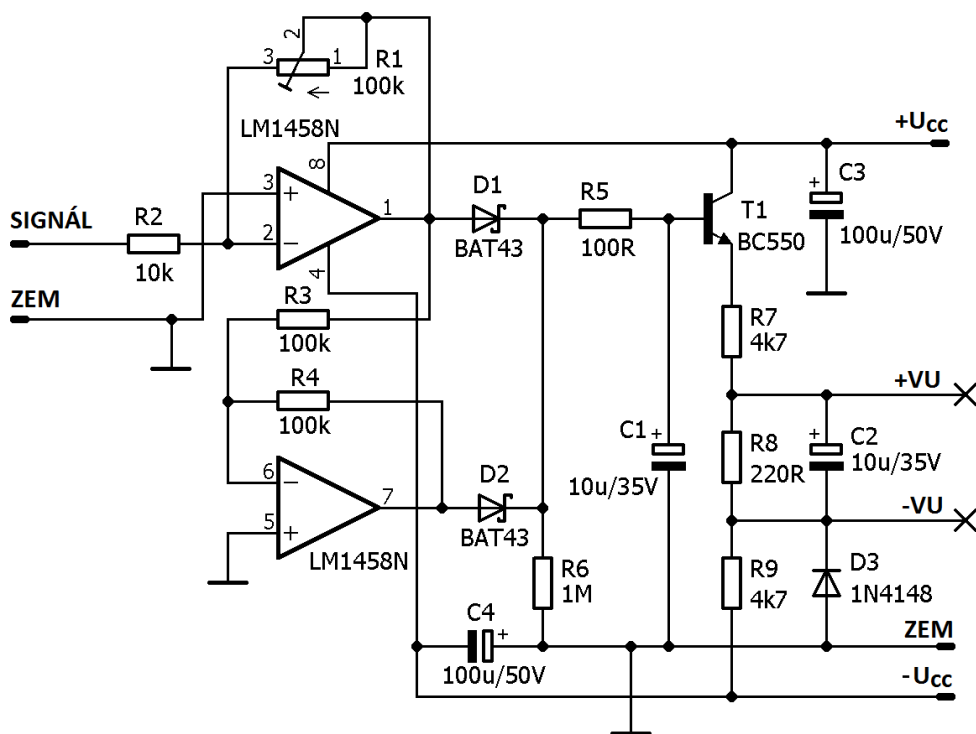
Každý kanál zesilovače obsahuje jeden indikátor vybuzení, který slouží k vizuálnímu zobrazení míry vybuzení zesilovače a s tím spojeným výstupním výkonem zesilovače. Ukazatelem vybuzení mohou být buď LED diody, nebo analogové VU metry. V této bakalářské práci byla zvolena varianta indikátoru vybuzení s analogovým VU metrem vyobrazeným na fotografii na Obr. 13. Schéma indikátoru vybuzení převzaté z [20] je pak uvedeno na Obr. 14.

Funkce elektrického obvodu indikátoru vybuzení je následovná. Vstupní signál, kterým je buzen výkonový zesilovač, je přiveden i na vstup indikátoru vybuzení. Zde je pomocí prvního operačního zesilovače zapojeného jako invertující zesilovač invertován a zesílen. Aby VU metr reagoval na kladné i záporné půlvlny vstupního signálu, je výstupní signál z prvního operačního zesilovače přiveden na vstup druhého, kde je opět invertován. Na výstupu druhého operačního zesilovače je tedy invertovaný signál z prvního operačního zesilovače. [20]



Obr. 13: Fotografie použitého analogového VU metru

Kladné půl vlny obou výstupních signálů jsou díky diodám D1 a D2 přivedeny na bázi tranzistoru T1. Ten pak podle velikosti těchto signálů reguluje proud rezistory R7 až R9 a analogovým VU metrem připojeným paralelně k rezistoru R8. Analogový VU metr je mikroampérmetr, který tento proud měří. K tomu, aby se velikost výchylky ručičky na VU metru snižovala pozvolně a tedy celý VU metr se nechoval jako špičkový indikátor, je použit kondenzátor C1, který zajišťuje pomalé uzavírání tranzistoru T1. [20]

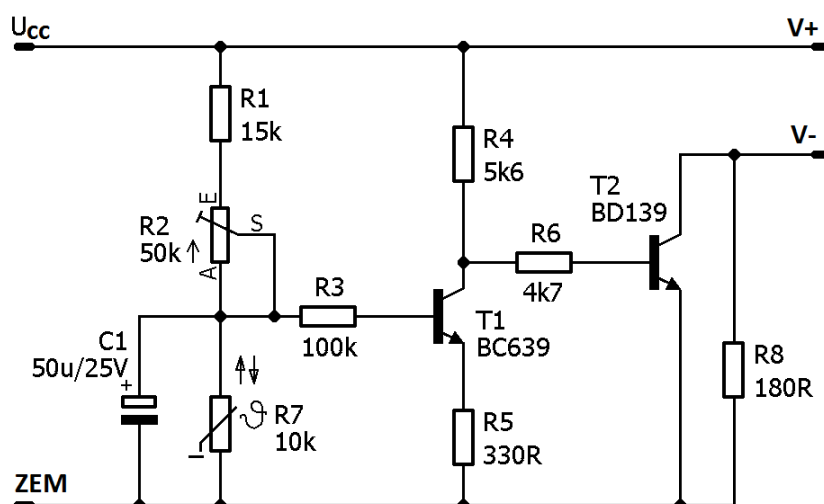


Obr. 14: Schéma zapojení indikátoru vybuzení [20]

Zesílení prvního operačního zesilovače, v závislosti na použitém VU metru, je nastavitelné trimrem R1. [20] Indikátor vybuzení je napájen z pomocného napájecího zdroje napětím ± 12 V. Výrobní podklady pro jeho realizaci jsou umístěny v příloze C.

5.4 Řízení ventilátoru

Při velkých výstupních výkonech je výkonová ztráta na koncových tranzistorech výkonového zesilovače značná. Aby se zabránilo velkému teplotnímu namáhání koncových tranzistorů a zároveň nebylo nutné použít rozměrné chladiče, bylo nutné chladiče osadit ventilátory, viz návrh chlazení zesilovače v kapitole 6. Otáčky každého ventilátoru jsou řízeny v závislosti na teplotě chladiče. K tomu slouží regulátor otáček ventilátoru [21], jehož schéma je vyobrazeno na Obr. 15.



Obr. 15: Schéma zapojení regulátoru otáček ventilátoru [21]

Regulátor otáček ventilátorů je teplotně svázán s chladičem pomocí negativního (NTC) termistoru ve schématu na Obr. 15 označeným jako $R7$. Ten je umístěn přímo na chladiči a pomocí vodičů připojen k desce plošných spojů s ostatními součástkami. Se vzrůstající teplotou odpor termistoru klesá, což má za důsledek pokles napětí mezi bází a kolektorem tranzistoru $T1$. Tím však na tranzistoru $T1$ roste napětí, kterým je zároveň otevírán tranzistor $T2$, čímž se na ventilátoru zvyšuje napětí. Ventilátor je připojen ke svorkám $V+$ a $V-$. Regulátor otáček ventilátorů je napájen z pomocného napájecího zdroje napětím 12 V. Pro plynulý rozjezd ventilátorů slouží kondenzátor $C1$, pro nastavení minimálních otáček ventilátoru pak trimr $R2$. [21]

Podklady pro výrobu regulátoru otáček ventilátoru jsou umístěny v příloze D.

5.5 Napájecí zdroj

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, pro každý kanál zesilovače, respektive pro každý výkonový zesilovač, je použit jeden napájecí zdroj. Každý s obou napájecích zdrojů se skládá ze soft startu, který je připojen přes pojistku přímo k síťovému napětí 230 V, napájen je však z jednoho sekundárního vinutí transformátoru. Soft start modul slouží k pozdnímu připojení transformátoru k plnému síťovému napětí, tj. k napětí 230 V. Dalšími částmi napájecího zdroje jsou transformátor, a modul napájecího zdroje, viz blokové schéma na Obr. 16.



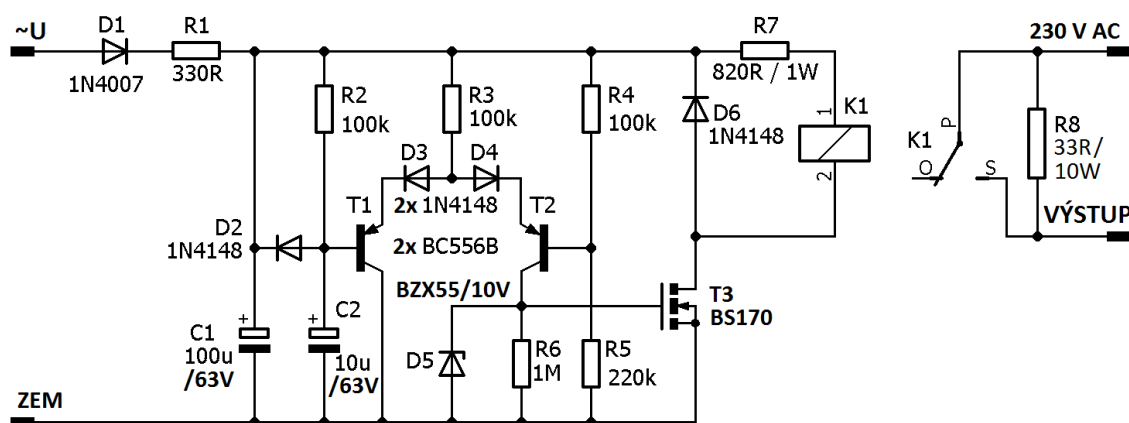
Obr. 16: Blokové schéma jednotlivých částí napájecího zdroje

5.5.1 Soft start

Funkcí soft startu je zamezit špičkám odebíraného proudu z elektrické sítě při zapnutí zesilovače, které vznikají v důsledku nabíjení kondenzátorů ve zdroji a nasycování jádra transformátoru. To se děje tak, že nejprve je transformátor připojen k napětí nižšímu, než je síťové a po určité době pak dochází k připojení transformátoru k síťovému napětí 230 V. Pro tyto účely se nejčastěji používá buď NTC termistor, nebo výkonový rezistor, který slouží jako předřadný odpor, přes který je transformátor připojen k elektrické síti. V případě varianty s NTC termistorem je tento termistor zahříván procházejícím proudem, takže klesá jeho odpor a snižuje se na něm úbytek napětí. Po určité době je pak na něm zanedbatelný napěťový úbytek, transformátor je tedy důsledkem toho připojen k síťovému napětí. Při použití konstrukce s výkonovým rezistorem, je tento rezistor po určité době zkratován pomocí relé.

Z těchto dvou konstrukcí soft startu byla vybrána druhá varianta používající výkonový rezistor a relé. Schéma zapojení soft startu, které bylo modifikováno z návodu k sestavení elektronické stavebnice XMX1152 z [22], je na Obr. 17.

V původním schématu se před cívkou relátka K1 nacházel předřadný rezistor s propojkou sloužící k volbě napětí na cívce relé tak, aby mohl být soft start napájen různými napětími. Protože je však soft start napájen výhradně střídavým napětím 29 V, byl rezistor včetně propojky odstraněn.



Obr. 17: Schéma zapojení soft startu, upraveno z [22]

Funkce soft startu je obdobná jako ochrany reproduktorů, viz kapitola 5.2. Přes rezistory R1 a R2 se nabíjí kondenzátor C1. Tím jak se na něm zvyšuje napětí, uzavírá se PNP tranzistor T1 a na emitorech tranzistorů T1 i T2 se zvyšuje napětí. Tranzistory

T1 a T2 jsou zapojeny jako rozdílový zesilovač. Ve chvíli, kdy na emitoru tranzistoru T2 je větší napětí, než na jeho bázi, tranzistor se otevře, čímž se zvýší napětí na rezistoru R6, což má za následek otevření NMOS tranzistoru T3. V důsledku toho dojde ke zvýšení napětí na cínce relé K1, které se sepne a zkratuje rezistor R8, čímž připojí primární vinutí transformátoru k plnému síťovému napětí.

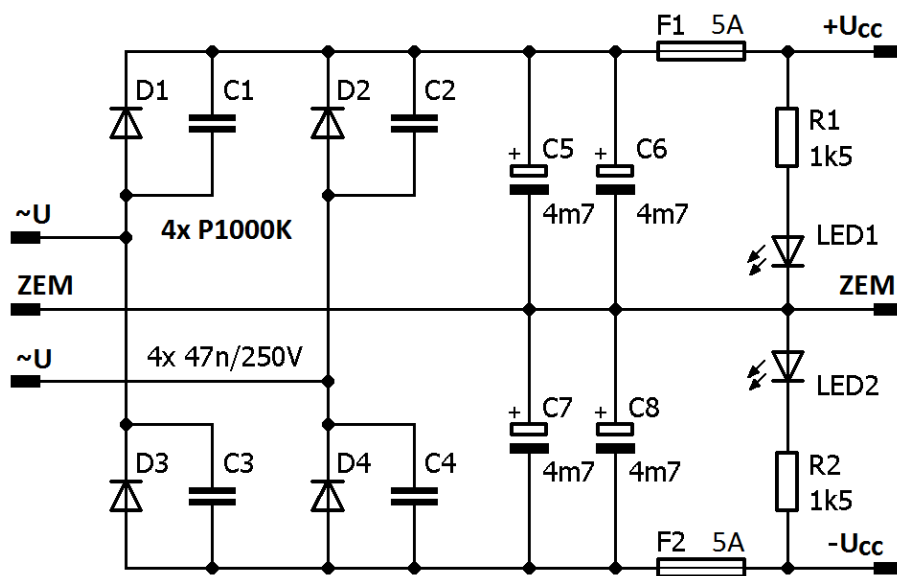
Soft start je napájen z jednoho sekundárního vinutí transformátoru, připojeného ke svorkám $\sim U$ a ZEM. Síťové napětí je připojeno ke svorce označené 230 V AC, primární vinutí transformátoru je pak připojeno ke svorce VÝSTUP. Výrobní podklady soft startu jsou uvedeny v přílohách E.1 až E.3.

5.5.2 Transformátor

Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, v každém z obou napájecích zdrojů zesilovače je použit toroidní transformátor se dvěma sekundárními vinutími, každé o efektivní hodnotě střídavého výstupního napětí 29 V. Celkový maximální výstupní výkon tohoto toroidního transformátoru udávaný výrobcem je 300 VA, maximální výstupní výkon jednoho sekundárního vinutí pak 150 VA.

5.5.3 Modul napájecího zdroje

Poslední dílčí částí napájecího zdroje je tzv. modul napájecího zdroje zesilovače, jehož schéma je vyobrazeno na Obr. 18. Obě sekundární vinutí transformátoru jsou zapojeny do série, čímž vznikne střed sekundárního vinutí transformátoru s potenciálem země. Ten je připojen ke svorce ZEM, zbylé dva vývody transformátoru jsou pak připojeny ke svorkám $\sim U$. Napětí ze sekundárních vinutí transformátoru je pak pomocí diod D1 až D4 usměrněno a vyhlazeno kondenzátory C5 až C8. Pro indikaci správné funkce je každá větev modulu napájecího zdroje opatřena LED diodou s předřadným odporem. Kondenzátory C1 až C4 slouží k potlačení pronikání vysokofrekvenčního rušení z elektrické sítě. Obě větve modulu napájecího zdroje jsou jištěny pomocí trubičkové pojistky.



Obr. 18: Schéma zapojení modulu napájecího zdroje

Hodnoty jednotlivých součástí modulu napájecího zdroje byly stanoveny následujícími výpočty, které pochází z [23]. Vzhledem k tomu, že je kladná i záporná větev modulu napájecího zdroje stejná, jsou uvedeny výpočty součástí pouze pro jednu větev. Jak již bylo zmíněno, efektivní hodnota střídavého napětí U_{ef} obou sekundárních vinutí transformátoru je 29 V, celkový výkon transformátoru udávaný výrobcem je 300 VA, výkon jednoho vinutí P_{VIN} je poloviční, tj. 150 VA. Nejprve je vypočítána maximální velikost efektivní hodnoty proudu I_{ef} [A], který lze odebírat z jednoho vinutí transformátoru.

$$P_{VIN} = U_{ef} \cdot I_{ef} \Rightarrow I_{ef} = \frac{P_{VIN}}{U_{ef}} = \frac{150}{29} = 5,17 \text{ A} \quad (19)$$

Tento proud protéká oběma diodami, které obsahuje jedna větev napájecího zdroje. Dále se kvůli dimenzování diod vypočítá střední I_{Dstr} [A] a efektivní I_{Def} [A] hodnota proudu procházející jednou diodou.

$$I_{Dstr} = \frac{I_{ef}}{2} = \frac{5,17}{2} = 2,59 \text{ A} \quad (20)$$

$$I_{Def} = \frac{I_{ef}}{\sqrt{2}} = \frac{5,17}{\sqrt{2}} = 3,66 \text{ A} \quad (21)$$

S ohledem na výše vypočtené proudy a dostupnost diod byly jako D1 až D4 zvoleny diody P1000K, s maximálním trvalým proudem 10 A a maximálním závěrným napětím 800 V. Napěťový úbytek U_f na každé diodě uváděný výrobcem je 0,9 V. Paralelně ke každé diodě byl umístěn odrušovací fóliový kondenzátor o kapacitě 47 nF a maximálním přípustným napětí 250 V. Ve schématu na Obr. 18 jsou tyto kondenzátory označeny jako C1 až C4.

Dále byla určena kapacita filtračních kondenzátorů. Maximální hodnota napětí U_{CC} [V] na kondenzátoru, které je i zároveň výstupním napětím z modulu napájecího zdroje, je stanovena pomocí následujícího vztahu.

$$U_{CC} = (\sqrt{2} \cdot U_{ef}) - U_f = (\sqrt{2} \cdot 29) - 0,9 = 40,1 \text{ V} \quad (22)$$

Pro velikost zvlnění výstupního napětí modulu napájecího zdroje se doporučuje nejlépe 5 až 10 %, protože při menším zvlnění by vznikaly, v důsledku velké kapacity filtračních kondenzátorů, velké proudové špičky odebíraného proud ze sítě. [23] Pro výpočet velikosti kondenzátoru bylo tedy zvoleno zvlnění výstupního napětí 10 %. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou takto zvlněného napětí ΔU [V] byl stanoven následujícím vztahem.

$$\Delta U = 0,1 \cdot U_{CC} = 0,1 \cdot 40,1 = 4,01 \text{ V} \quad (23)$$

Pomocí následující rovnice se vypočítá velikost filtračních kondenzátorů. [23] V rovnici (24) bylo jako I_{ef} [A] dosazena efektivní hodnota maximálně možného trvale odebíraného proudu z modulu napájecího zdroje, T [s] pak značí periodu elektrické stě, která je převrácenou hodnotou její frekvence, tj. 50 Hz. Ostatní dosazení veličiny pocházejí z předchozích výpočtů. [23]

$$C = \frac{T}{2} \cdot \frac{I_{ef}}{\Delta U} \left[1 - \frac{1}{\pi} \cdot \arccos \left(1 - \frac{\Delta U}{U_{CC}} \right) \right] \text{ [F]} \quad (24)$$

$$C = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{5,17}{4,01} \left[1 - \frac{1}{\pi} \cdot \arccos \left(1 - \frac{4,01}{40,1} \right) \right] = 11,04 \text{ mF}$$

S ohledem na vypočtenou hodnotu a cenu požadovaných filtračních kondenzátorů jsou použity v každé větvi dva 4700 μF elektrolytické kondenzátory na napětí 50 V zapojené paralelně, ve schématu na Obr. 18 jsou značeny jako C5 až C8. Ty jsou i přes menší celkovou kapacitu, než jaká byla vypočtena, dostatečné. Ve výpočtu bylo totiž počítáno z nejhorší možnou variantou, tj. trvalým odběrem maximálního proudu, jaký dovoluje transformátor. K tomuto případu však při normálním provozu zesilovače nedojde.

Modul napájecího zdroje taktéž obsahuje v každé své větvi LED diodu indikující správnou funkci zdroje. Zde byly použity modré LED diody na napětí $U_{LED} = 3,2 \text{ V}$ a s doporučeným proudem $I_{LED} = 25 \text{ mA}$. Ke každé LED diodě je použit předřadný rezistor, jehož velikost a výkonové zatížení bylo vypočítáno pomocí následujících vztahů.

$$R = \frac{U_{CC} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{40,1 - 3,2}{25 \cdot 10^{-3}} = 1476 \text{ } \Omega \quad (25)$$

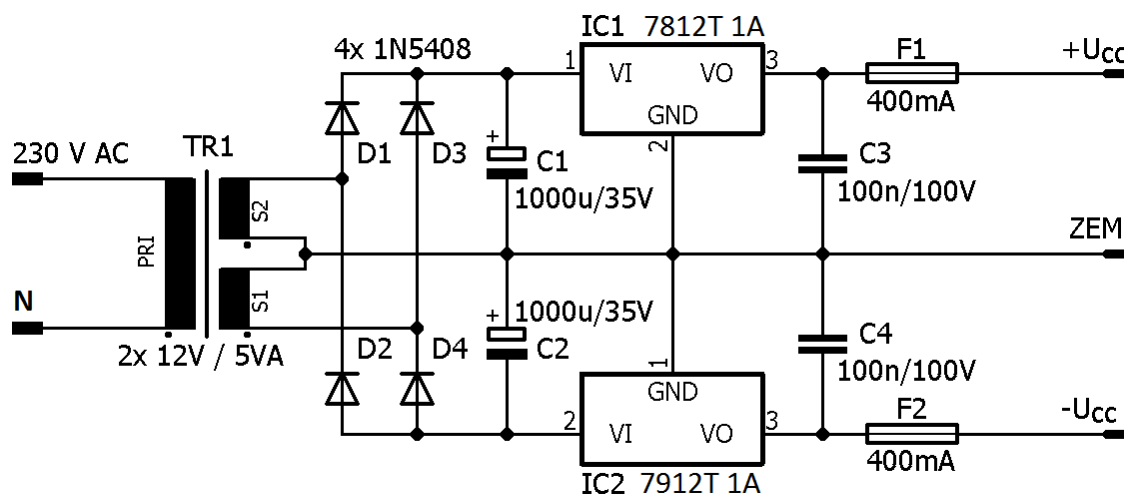
$$P_R = (U_{CC} - U_{LED}) \cdot I_{LED} = (40,1 - 3,2) \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 0,92 \text{ W} \quad (26)$$

Jako předřadné rezistory (R1 a R2) pro LED diody byly použity 1,5 k Ω rezistory s výkonovým zatížením 2 W. Dále byla na modulu napájecího zdroje pro každou větev použita 5 A trubičková pojistka, která brání přetížení zdroje. Pro připojení transformátoru a ostatních periférií byly na modulu napájecího zdroje umístěny faston konektory. Podklady pro výrobu modulu napájecího zdroje jsou uvedeny v přílohách E.4 až E.6.

5.6 Pomocný napájecí zdroj

V předchozí kapitole navržený napájecí zdroj má zvolené výstupní napětí s ohledem na výkonový zesilovač. Toto napětí je však příliš velké na to, aby jim mohli být napájeny indikátory vybuzení a řízení ventilátoru. Výstupní napětí napájecího zdroje by bylo možné snížit, například stabilizátorem, avšak velkou nevýhodou by byly příliš vysoké výkonové ztráty. Zesilovač proto obsahuje mimo dvou napájecích zdrojů ještě

jeden pomocný napájecí zdroj, kterým jsou napájeny oba indikátory vybuzení i obě řízení ventilátorů. Jeho schéma je na Obr. 19.



Obr. 19: Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje

Základem pomocného napájecího zdroje je transformátor do DPS se dvěma sekundárními vynutí, každé o napětí 12 V a výkonu 5 VA, ty jsou spojeny do série a tím je tedy vyveden střed sekundárního vinutí transformátoru, respektive vodič s potenciálem země. Výstupní napětí z transformátoru je pak usměrněno pomocí čtveřice usměrňovacích diod D1 až D4 a vyhlazeno kondenzátory C1 a C2. Dále jsou použity dva 12 V napěťové stabilizátory, aby bylo docíleno stabilního napětí na výstupu pomocného napájecího zdroje. Pro zlepšení stability výstupního napětí pomocného napájecího zdroje jsou použity kondenzátory C3 a C4. Pomocný napájecí zdroj má tedy výstupní napětí ± 12 V a maximální zatěžovací proud 400 mA, což je s rezervou více než dostatečné pro napájení již zmíněných částí zesilovače. Aby bylo možné k pomocnému napájecímu zdroji připojit každé řízení ventilátorů a indikátory vybuzení zvlášť, jsou na navržené desce plošných spojů umístěny dva konektory pro připojení řízení ventilátorů a jeden pro připojení indikátorů vybuzení, viz osazovací schéma v příloze F. Pro větší přehlednost, nejsou všechny tyto konektory na schématu zapojení pomocného napájecího zdroje na Obr. 19, zakresleny. Všechny výrobní podklady pro výrobu pomocného napájecího zdroje jsou uvedeny v příloze F.

6 Měření parametrů zesilovače

Kapitola měření parametrů zesilovače, jak již z jejího názvu vypovídá, se věnuje především měřením parametrů výkonového zesilovače typu Leach. Ostatní části zesilovače byly pouze oživeny a odzkoušeny.

Ještě před samotným měřením bylo potřeba výkonový zesilovač oživit a nastavit jeho klidový pracovní bod. Nejprve byly k desce plošných spojů výkonového zesilovače připojeny koncové tranzistory umístěné na chladiči Boucherotův člen a další potřebné součásti. Při prvním oživení byl zesilovač napájen, ze dvou laboratorních zdrojů značky Diametral P230R51D s proudovou regulací napětím ± 12 V. Poté co se ukázalo, že zesilovač funguje správně, bylo jeho napájecí napětí zvýšeno na hodnotu stejnou, jakou jej bude napájet napájecí zdroj, viz kapitola 5.5.3, tj. $\pm 40,1$ V. Posledním krokem oživení výkonového zesilovače bylo nastavení klidového proudu koncovými tranzistory. Pro jeho přesnější nastavení byl použit osciloskop. Poté změnou odporu trimru P1 byl zvyšován klidový proud procházející koncovými tranzistory do té doby, dokud bylo na osciloskopu zřetelné přechodové zkreslení signálu. V důsledku ohřívá koncových tranzistorů, bylo nutné klidový proud ještě doladit. K jeho ustálení pak došlo přibližně po 10 minutách. Výsledná velikost nastaveného klidového pracovního proudu odpovídala přibližně jeho doporučené velikosti udávané v [16], tedy proudu 50 mA každým koncovým tranzistorem.

Celý zesilovač, jak už bylo několikrát zmíněno, obsahuje dva výkonové zesilovače typu Leach. Při měření bylo zjištěno, že jejich parametry jsou navzájem téměř totožné. Ve všech následujících podkapitolách jsou proto uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty parametrů pouze jednoho výkonového zesilovače. Změřeny byly pouze některé základní parametry zesilovače.

Pro měření jednotlivých parametrů zesilovače a jeho oživení byly použity tyto následující přístroje.

- Osciloskop UNI-T UTD2052CEL
- Laboratorní napájecí zdroj Diametral P230R51D (2 kusy)
- Generátor Agilent 33521A
- Multimetr METEX M-3870D

Při měření všech následujících parametrů zesilovače bylo použito napájecí napětí výkonového zesilovače $U_{CC} = \pm 40,1$ V. Pokud v následujících podkapitolách není označeno jinak, jsou všechny hodnoty uvedené jako efektivní.

6.1 Výkon, příkon a účinnost výkonového zesilovače

Při měření výkonu, příkonu a účinnosti výkonového zesilovače bylo postupně nastavováno vstupní napětí zesilovače U_{VST} v rozsahu 100 mV až 1,2 V. U vstupního napětí 1,2 V začínala již být na osciloskopu patrná limitace zesilovače, v tuto chvíli byl

tedy zesilovač plně vybuzen. Při každém nastaveném vstupním napětí U_{VST} [V] pak byl změřen proud odebíraný ze zdroje I_{ZDR} [A], a napětí na výstupu zesilovače U_{VYST} [V], respektive na zátěži zesilovače. Z této hodnoty napětí a proudu pak byl vypočítán výkon P_{VYST} [W], příkon P_{VST} [W] a účinnost η [%] výkonového zesilovače. Dále byl i vypočítán ztrátový výkon P_{ZTR} [W], který je v zesilovači přeměněn na teplo. Měření bylo prováděno pro zatěžovací impedanci Z_Z o velikosti 8 Ω a 4 Ω , kterou tvořila soustava výkonových rezistorů. Frekvence vstupního napětí U_{VST} výkonového zesilovače byla 1 kHz. Naměřené hodnoty pro zatěžovací impedanci Z_Z o velikosti 8 Ω jsou uvedeny v Tab. 1, pro zatěžovací impedanci Z_Z o velikosti 4 Ω pak v Tab. 2.

Tab. 1: Hodnoty výkonu, příkonu a účinnosti při zatěžovací impedanci 8 Ω

Zatěžovací impedance $Z_Z = 8 \Omega$						
U_{VST} [mV]	I_{ZDR} [A]	U_{VYST} [V]	P_{VST} [W]	P_{VYST} [W]	η [%]	P_{ZTR} [W]
100	0,13	2,40	10,43	0,72	6,91	9,71
300	0,38	6,40	30,48	5,12	16,80	25,36
500	0,62	10,60	49,72	14,05	28,25	35,68
800	0,99	16,91	79,40	35,74	45,02	43,65
1000	1,23	21,90	98,65	59,95	60,77	38,69
1100	1,35	23,18	108,27	67,16	62,03	41,11
1200	1,46	25,06	117,09	78,50	67,04	38,59

Tab. 2: Hodnoty výkonu, příkonu a účinnosti při zatěžovací impedanci 4 Ω

Zatěžovací impedance $Z_Z = 4 \Omega$						
U_{VST} [mV]	I_{ZDR} [A]	U_{VYST} [V]	P_{VST} [W]	P_{VYST} [W]	η [%]	P_{ZTR} [W]
100	0,26	2,21	20,85	1,22	5,86	19,63
300	0,73	6,62	58,55	10,96	18,71	47,59
500	1,21	10,85	97,04	29,43	30,33	67,61
800	1,92	17,14	153,98	73,44	47,70	80,54
1000	2,40	21,39	192,48	114,38	59,43	78,10
1100	2,62	23,34	210,12	136,19	64,81	73,94
1200	2,74	24,27	219,75	147,26	67,01	72,49

Hodnoty výkonu, příkonu a účinnosti výkonového zesilovače při různém vstupním napětí byly vypočítány pomocí následujících rovnic. Do všech uvedených příkladů výpočtů jsou dosazeny hodnoty z prvního řádku Tab. 1.

Výkon P_{VST} [W], odebíraný z napájecího zdroje, byl vypočítán z napájecího napětí U_{CC} [V] a proudu odebíraného ze zdroje I_{ZDR} [A] pomocí následující rovnice.

$$P_{VST} = 2 \cdot U_{CC} \cdot I_{ZDR} = 2 \cdot 40,1 \cdot 0,13 = 10,43 \text{ W} \quad (27)$$

Dále pak byl vypočítán výstupní výkon P_{VYST} [W] výkonového zesilovače dodávaný do zátěže Z_Z [Ω]. Při tomto výpočtu bylo do rovnice (28) [3] dosazeno naměřené výstupní napětí U_{VYST} [V] naměřené při daném vstupním napětí.

$$P_{VYST} = \frac{U_{VYST}^2}{Z_Z} = \frac{2,40^2}{8} = 0,72 \text{ W} \quad (28)$$

Účinnost výkonového zesilovače η [%] při daném vstupním napětí a ztrátový výkon P_{ZTR} [W] na výkonovém zesilovači, byly stanoveny z výkonu odebíraného ze zdroje P_{VST} [W] a výkonu dodávaného do zátěže P_{VYST} [W] následujícími rovnicemi.

$$\eta = \frac{P_{VYST}}{P_{VST}} \cdot 100 = \frac{0,72}{10,40} \cdot 100 = 6,91 \% \quad (29)$$

$$P_{ZTR} = P_{VST} - P_{VYST} = 10,43 - 0,72 = 9,71 \text{ W} \quad (30)$$

Jak je z Tab. 1 a Tab. 2 patrné, výkonový zesilovač je při zvoleném napájecím napětí schopen dodávat do 8Ω zátěže výkon 78,5 W, do 4Ω zátěže pak skoro dvojnásobek, tj. 147,26 W. Účinnost výkonového zesilovače roste spolu s velikostí vstupního respektive výstupního napětí, při obou velikostech zátěže bylo dosaženo maximální účinnosti přibližně 67 %.

Měřením výkonu dodávaného do zátěže se dále potvrdilo, že zesilovač je skutečně vhodný k již zmiňovaným reproduktorům s maximálním trvalým výkonem 100 W a impedancí 8Ω . Taktéž navržené napájecí zdroje pro oba výkonové zesilovače jsou s ohledem na naměřený maximální odebíraný výkon ze zdroje při zatěžovací impedanci 4Ω více než dostatečné.

Během měření došlo k poměrně značnému zahřátí hliníkového chladiče koncových tranzistorů, který měl rozměry 250 x 90 x 25 mm. Při nejvyšších dosažených teplotách chladiče a desky plošného spoje výkonového zesilovače bylo pomocí termokamery vyfoceno jejich teplotní pole. Tyto fotografie teplotního pole pak posloužili pro zjištění ztrátového výkonu na jednotlivých součástkách výkonového zesilovače. Více je popsáno v kapitole 7.2.

6.2 Kmitočtová charakteristika výkonového zesilovače

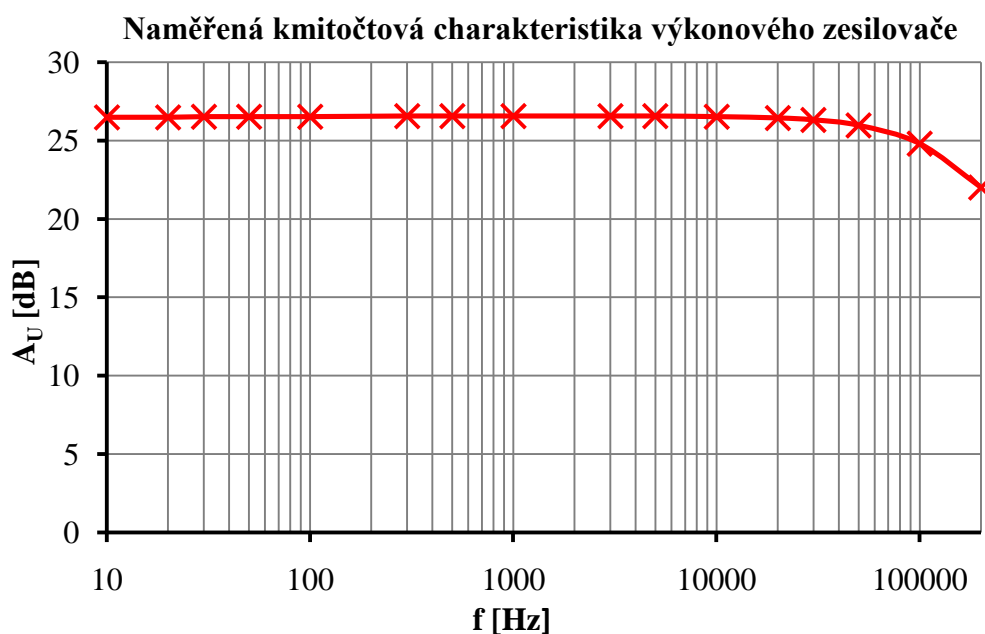
Kmitočtová charakteristika výkonového zesilovače Leach byla proměřena v rozsahu 10 Hz až 200 kHz, což je vzhledem k určenému použití zesilovače více než dostatečné. Navíc při vyšších frekvencích již docházelo k velkému zahřívání Boucherotova členu. Kmitočtová charakteristika byla změřena při vstupním napětí U_{VST} zesilovače o velikosti 100 mV a frekvenci 1 kHz. Výkonový zesilovač byl při tomto měření zatížen 8Ω zátěží. Z naměřených hodnot výstupního napětí a vypočteného zesílení uvedených v Tab. 3 lze vyčíst, že zesílení sestaveného výkonového zesilovače typu Leach se v rozsahu 10 Hz až 20 kHz výrazně nemění a splňuje Hi-Fi normu, která dovoluje odchylku od ideálně rovné kmitočtové charakteristiky nejvýše $\pm 1,5$ dB [1]. Vypočtená hodnota napěťového zesílení v tomto rozsahu je přibližně 26,5 dB, tedy 21,1 [-]. Celá naměřená kmitočtová charakteristika je pak uvedena na Obr. 20.

Tab. 3: Vypočtené hodnoty napěťového zesílení výkonového zesilovače Leach

f [Hz]	U_{VYST} [V]	A_U [dB]
10	2,11	26,49
20	2,11	26,49
30	2,12	26,53
50	2,12	26,53
100	2,12	26,53
300	2,13	26,57
500	2,13	26,57
1000	2,13	26,57
3000	2,13	26,57
5000	2,13	26,57
10000	2,12	26,53
20000	2,10	26,44
30000	2,07	26,32
50000	1,99	25,98
100000	1,74	24,81
200000	1,26	22,01

Napěťové zesílení A_U [dB] výkonového zesilovače viz Tab. 3 bylo vypočteno ze vstupního U_{VST} [V] a výstupního U_{VYST} [V] napětí výkonového zesilovače pomocí následující rovnice. [4] Dosazené hodnoty v rovnici jsou z prvního řádku Tab. 3.

$$A_U = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{VYST}}{U_{VST}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{2,11}{0,1}\right) = 26,49 \text{ dB} \quad (31)$$



Obr. 20: Naměřená kmitočtová charakteristika výkonového zesilovače Leach

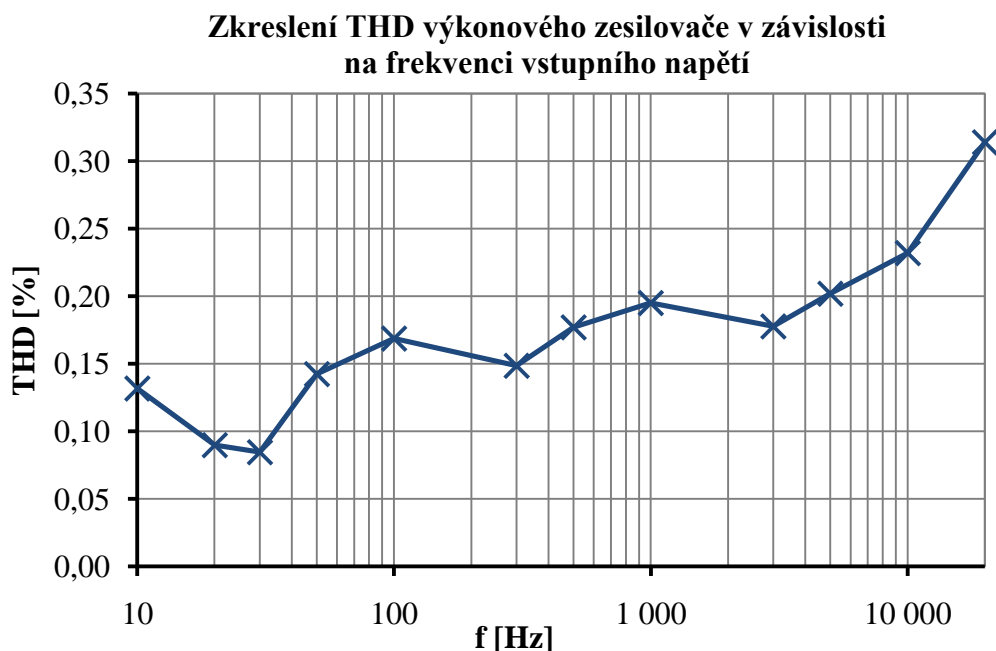
6.3 Harmonické zkreslení výkonového zesilovače

U zkonstruovaného výkonového zesilovače typu Leach bylo změřeno jeho harmonické zkreslení v závislosti na frekvenci vstupního signálu a taktéž v závislosti na výstupním výkonu zesilovače dodávaného do zátěže. Toto měření bylo provedeno pomocí osciloskopu v režimu rychlé Fourierovi transformace (FFT), při níž byla odečtena velikost jednotlivých vyšších harmonických složek výstupního napětí zesilovače. Z nich pak bylo pomocí rovnice (3) vypočítáno harmonické zkreslení (THD) výstupního napětí zesilovače. Všechny vypočítané hodnoty harmonického zkreslení jsou pouze orientační, protože při měření byly některé vyšší harmonické složky natolik malé, že je bylo obtížné odlišit od šumu.

Harmonické zkreslení výkonového zesilovače bylo změřeno ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 20 kHz při vstupním napětí výkonového zesilovače 500 mV a zatěžovací impedanci 8 Ω . V Tab. 4 jsou kvůli přehlednosti uvedeny pouze již vypočtené hodnoty harmonického zkreslení, všechny naměřené hodnoty jsou pak uvedeny v příloze na DVD. Jak je z naměřených hodnot patrné, velikost harmonického zkreslení zkonstruovaného výkonového zesilovače typu Leach nepatrně roste s frekvencí vstupního napětí, ale i jeho nejvyšší hodnota je menší než 0,4 %. Grafická závislost harmonického zkreslení výkonového zesilovače na frekvenci vstupního napětí je na Obr. 21.

Tab. 4: Zkreslení THD výkonového zesilovače v závislosti na frekvenci

f [Hz]	THD [%]
10	0,132
20	0,090
30	0,085
50	0,143
100	0,169
300	0,149
500	0,177
1000	0,195
3000	0,178
5000	0,202
10000	0,232
20000	0,314

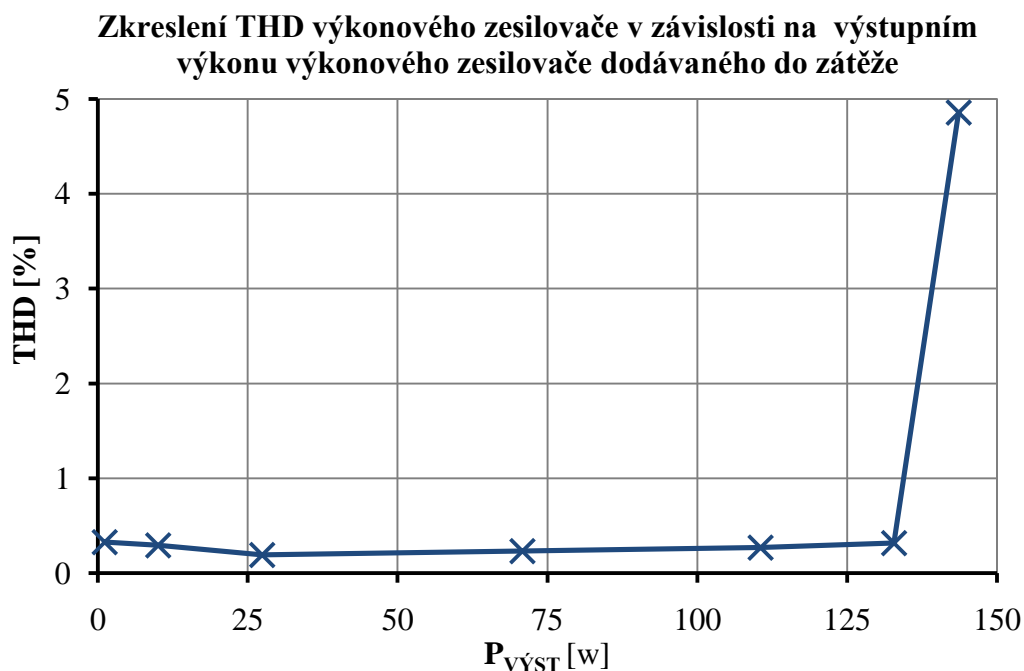


Obr. 21: Harmonické zkreslení THD v závislosti na frekvenci vstupního napětí

Jak již bylo řečeno, harmonické zkreslení výkonového zesilovače bylo změřeno i při různém výstupním výkonu zesilovače dodávaného do zátěže. Při měření byla nastavována velikost vstupního napětí výkonového zesilovače, dodávaný výkon do zátěže pak byl ze změřeného výstupního napětí výkonového zesilovače dopočítán stejně jako v kapitole 6.1. Frekvence vstupního napětí při celém měření byla 1 kHz, velikost zatěžovací impedance pak 4 Ω . Vypočtené hodnoty harmonického zkreslení jsou uvedeny v Tab. 5. Grafická závislost harmonického zkreslení výkonového zesilovače na výkonu dodávaného do zátěže je pak na Obr. 22. Při vstupním napětí 1,2 V již začínalo být patrné ořezání výstupního napětí vlivem limitace zesilovače, v tuto chvíli bylo tedy i díky tomu harmonické zkreslení výstupního napětí výkonového zesilovače nejvyšší, přibližně 4,8 %. Při ostatních nastavených vstupních napětích pak bylo harmonické zkreslení menší než 0,4 %. Všechny naměřené hodnoty jednotlivých harmonických složek výstupního napětí výkonového zesilovače jsou opět uvedeny v příloze na DVD.

Tab. 5: Zkreslení THD výkonového zesilovače v závislosti na jeho výkonu

U_{VST} [mV]	U_{VYST} [V]	P_{VYST} [W]	THD [%]
100	2,12	1,12	0,330
300	6,34	10,05	0,296
500	10,47	27,41	0,195
800	16,83	70,81	0,234
1000	21,02	110,57	0,271
1100	23,05	132,83	0,320
1200	23,97	143,64	4,859



Obr. 22: Harmonické zkreslení THD v závislosti na výkonu dodávaného do zátěže

6.4 Ostatní měřené parametry

Mimo změřené parametry výkonového zesilovače typu Leach uvedené v předchozích kapitolách, bylo také změřeno stejnosměrné napětí na výstupu výkonového zesilovače ve chvíli, kdy k němu není připojeno žádné vstupní napětí, tzn. offset a dále pak rychlost přeběhu, tzv. Slew Rate. Velikost offsetu na výstupu obou sestavených výkonových zesilovačů se pohybovala v rozmezí 4,2 mV až 12,6 mV v závislosti na zahřátí jednotlivých součástek. Offset se navzájem u obou výkonových zesilovačů nepatrně odlišoval kvůli toleranci součástek a dalším vlivům.

Rychlost přeběhu byla změřena při buzení výkonového zesilovače signálem obdélníkového průběhu s napětím špička-špička $U_{p-p} = 200 \text{ mV}$, frekvencí 1 kHz a střídou 1:1. Čas Δt [s] i napětí ΔU [V] potřebné pro výpočet rychlosti přeběhu pak byly změřeny pomocí kurzorů osciloskopu mezi 10 % a 90 % náběžné i sestupné hrany výstupního napětí výkonového zesilovače. Tyto naměřené hodnoty včetně vypočtené rychlosti přeběhu (SR) jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6: Naměřená rychlost přeběhu výkonového zesilovače

Hrana výstupního napětí	ΔU [V]	Δt [μs]	SR [$\text{V}/\mu\text{s}$]
Náběžná	3,98	0,256	15,55
Sestupná	3,98	0,248	16,04

Rychlost přeběhu výkonového zesilovače byla vypočítána následujícím vztahem, v němž jsou dosazeny hodnoty z prvního řádku Tab. 6.

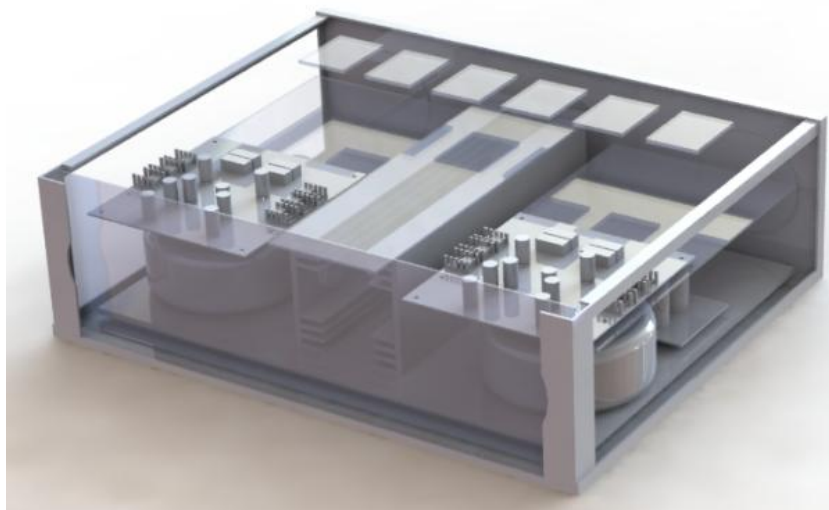
$$SR = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{3,98}{0,256} = 15,55 \text{ V}/\mu\text{s} \quad (32)$$

7 Návrh chlazení zesilovače

Pro návrh chlazení zesilovače včetně rozmístění jednotlivých jeho součástí byla zvolena moderní výpočetní metoda CFD (computational fluid dynamics), kterou obsahuje CAD systému SolidWorks respektive jeho nástroj Flow Simulation. Oproti klasické výpočetní metodě tím byl návrh chlazení značně usnadněn, bylo umožněno jednoduše zjistit proudění vzduchu uvnitř zesilovače, zahřívání jeho součástí a taktéž navrhnou optimální rozmístění jednotlivých součástí uvnitř skříně zesilovače. Navíc při všech provedených simulacích byl získán výstup jednotlivých výsledků v grafické podobě. Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, výkonový zesilovač typu Leach může být použit i k $4\ \Omega$ zátěži, respektive reproduktorům. Chlazení zesilovače proto bylo simulacemi dimenzováno na ztrátový výkon na zesilovači a generované teplo při této zátěži.

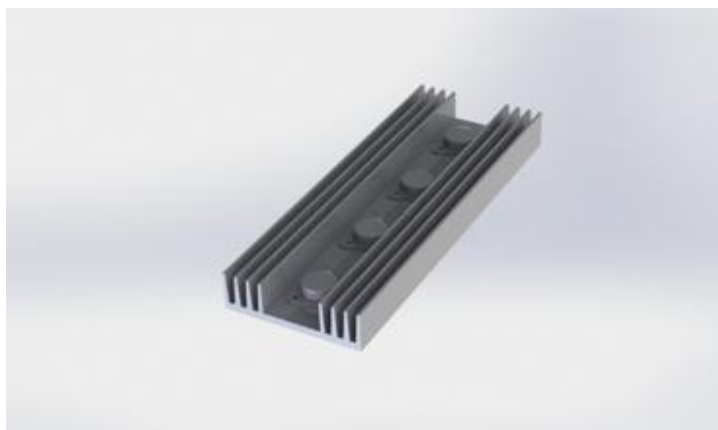
7.1 Geometrický model zesilovače

Pro teplotní simulaci byl pomocí CAD systému SolidWorks vytvořen geometrický model celého zesilovače. Celý geometrický model zesilovače byl vymodelován formou sestavy, kdy základem byla zamýšlená přístrojová skříň zesilovače s rozměry 435 x 348 x 128 mm. Do ní pak byly vkládány ostatní vymodelované součásti. Příklad geometrického modelu použitého při simulaci výsledného návrhu chlazení zesilovače je uveden Obr. 23.



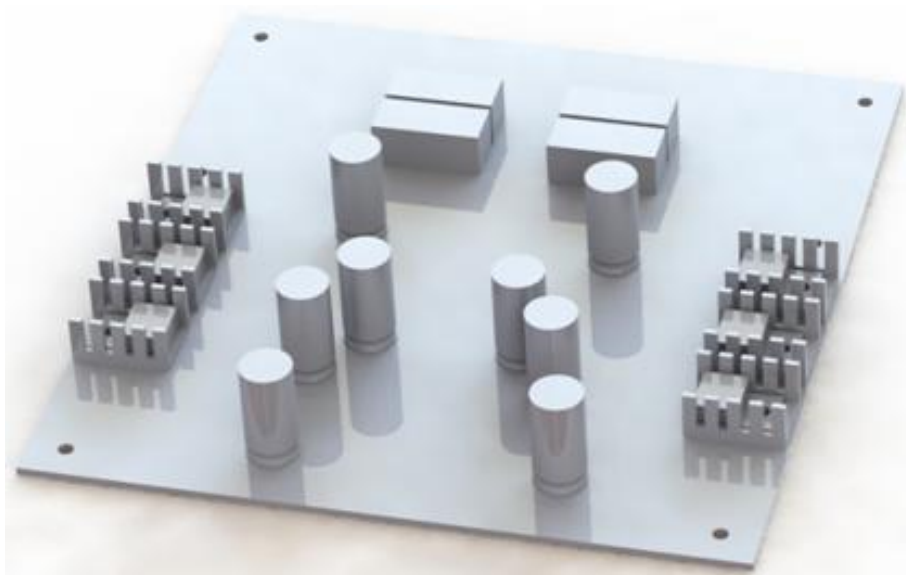
Obr. 23: Geometrický model zesilovače použitý ve finálním návrhu chlazení

Nejvýznamnějšími součástmi geometrického modelu byla již zmíněná přístrojová skříň, dále pak chladič koncových tranzistorů (Obr. 24) a deska plošného spoje výkonového zesilovače (Obr. 25), jež byly vymodelovány formou podsestavy.



Obr. 24: Geometrický model chladiče koncových tranzistorů

Geometrický model zesilovače však byl hlavně z důvodu úspory času potřebného k výpočtu simulací zjednodušen. Odebrány však byly pouze ty části zesilovače, které se na celkovém ztrátovém výkonu zesilovače vůbec nepodíleli, nebo jejich podíl byl zanedbatelný, viz následující kapitola 7.2 a zároveň však jejich odebrání nemělo vliv na celkový charakter proudění a přenos tepla uvnitř zesilovače. Ostatní součásti zesilovače pak byly pouze zjednodušeny tak, aby jejich modelování nebylo příliš náročné. Příkladem zjednodušení je na Obr. 25 uvedená deska plošných spojů výkonového zesilovače.



Obr. 25: Geometrický model DPS výkonového zesilovače

7.2 Ztrátové výkony na jednotlivých částech zesilovače

Ještě před samotným nastavením a provedením simulací byly stanoveny ztrátové výkony na součástkách použitých v jednotlivých částech zesilovače. Jak se při testování jednotlivých částí zesilovače ukázalo, zdaleka největší ztrátové výkony, a s nimi spjaté generované teplo, byly na koncových tranzistorech výkonových zesilovačů, dále pak na součástkách samotných výkonových zesilovačů a na transformátorech. Na ostatních

částech zesilovače byly ztrátové výkony a tím generované teplo oproti těmto již zmiňovaným částem zanedbatelné, a to včetně usměrňovacích diod v napájecích zdrojích či napěťových stabilizátorů v pomocném napájecím zdroji. Při simulacích proto jejich ztrátové výkony nebyly uvažovány, a jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, samotný geometrický model zesilovače tak mohl být výrazně zjednodušen.

Při měření parametrů zesilovače v kapitole 6.1 bylo zjištěno, že největší ztrátový výkon přeměněný na teplo na jednom výkonovém zesilovači včetně koncových tranzistorů byl 80,54 W, viz Tab. 2. Od toho výkonu byly odečteny ztrátové výkony na jednotlivých součástkách umístěných na desce plošných spojů výkonového zesilovače, čímž byl zjištěn ztrátový výkon na samotných koncových tranzistorech. Ztrátový výkon na emitorových rezistorech koncových tranzistorů, ve schématu na Obr. 8 značených jako R45 až R48, byl stanoven z jejich odporu R_{RE} , který činí $0,33 \Omega$ a maximálního proudu I_{RE} [A], který každým z těchto tranzistorů procházel. Tento proud byl stanoven pomocí následujícího vztahu z maximálního výstupního napětí zesilovače $U_{VYST} = 24,27$ V a zatěžovací impedance $Z_Z = 4 \Omega$, která při tomto měření byla použita. Jeho velikost je čtvrtinová oproti celkovému proudu, jenž teče do zátěže.

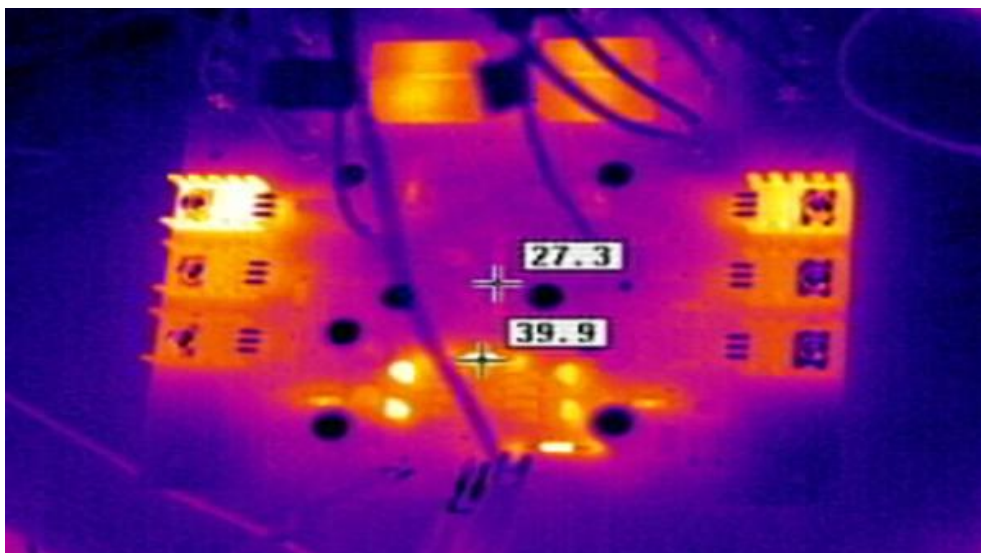
$$I_{RE} = \frac{U_{VYST}}{Z_Z \cdot 4} = \frac{24,27}{4 \cdot 4} = 1,52 \text{ A} \quad (33)$$

Poté byl vypočítán ztrátový výkon P_{RE} [W] na jednotlivých rezistorech. Emitorové rezistory koncových tranzistorů jsou v modelu desky plošných spojů výkonového zesilovače na Obr. 28 vymodelovány ve tvaru obdélníků.

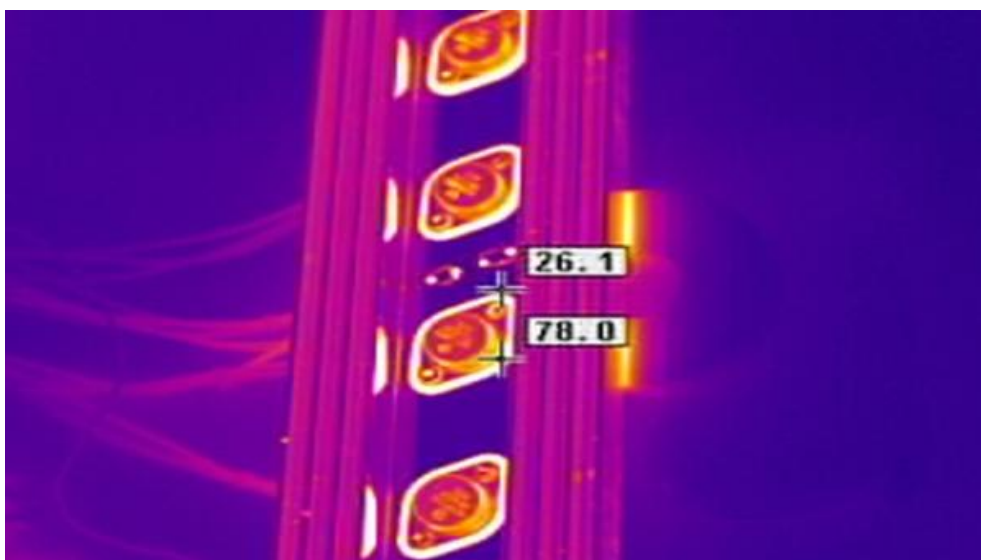
$$P_{RE} = R_{RE} \cdot I_{RE}^2 = 0,33 \cdot 1,52^2 = 0,76 \text{ W} \quad (34)$$

Stanovení ztrátových výkonů u ostatních součástek výkonového zesilovače podobnými výpočty jako v případě emitorových tranzistorů koncových tranzistorů již nebylo možné, protože by samotnému výpočtu předcházelo poměrně náročné měření veličin potřebných pro samotný výpočet.

Při měření parametrů výkonových zesilovačů uvedených v kapitole 6 proto byla maximální dosažená teplota součástek na desce plošných spojů výkonového zesilovače (Obr. 26) i maximální teplota chladičů (Obr. 27) zjištěna pomocí termokamery EasIR – 9. Poté byly experimentálně pomocí simulace teplotního pole, zvláště modelu desky plošných spojů a zvláště chladiče a následným srovnáním teplot s příslušným snímkem teplotního pole z termokamery, zjištěny přibližné ztrátové výkony požadovaných součástek.



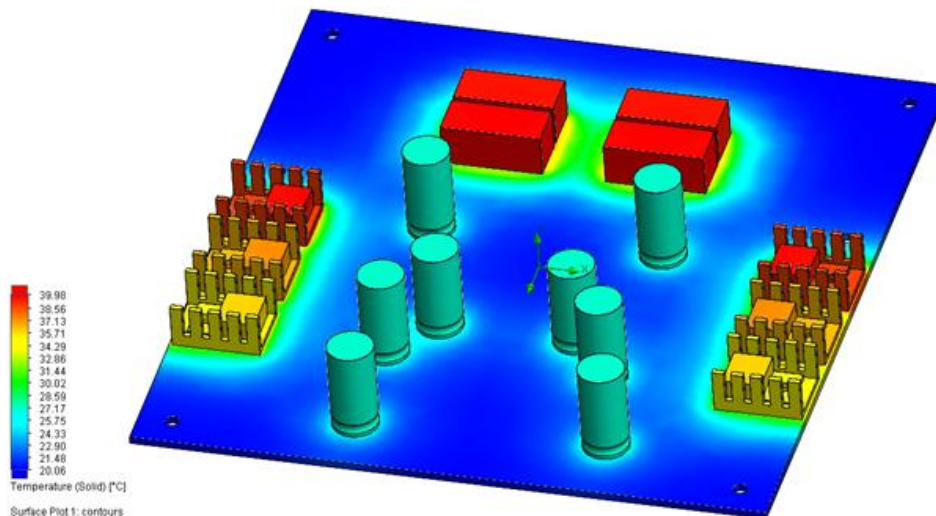
Obr. 26: Deska plošných spojů výkonového zesilovače vyfocená termokamerou



Obr. 27: Chladič koncových tranzistorů vyfocen termokamerou

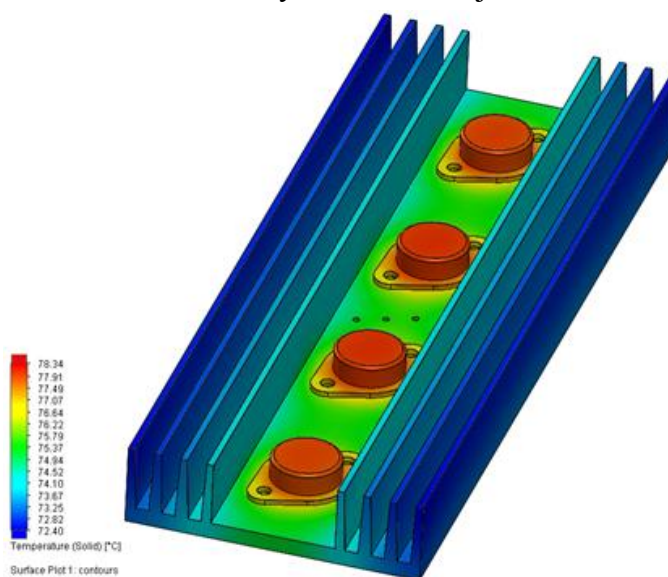
Na Obr. 26 vyfoceném pomocí termokamery jde vidět zahřívání jednotlivých součástek na desce plošných spojů výkonového zesilovače. Jak bylo předpokládáno, nejvyšší teplotu měli tranzistory ve druhém a řídícím stupni výkonového zesilovače, viz kapitoly 5.1.2 a 5.1.3 a dále pak již vypočtené emitorové rezistory koncových tranzistorů. Dalšími součástkami, které měly podle měření teploty termokamerou zvýšenou teplotu oproti okolí, byly tranzistory a některé rezistory ve vstupním stupni. Výkonová ztráta na těchto tranzistorech však byla zanedbatelná. Jejich vyšší teplota byla důsledkem relativně malých pouzder, navíc ohmatem byla, stejně jako u rezistorů ve vstupním stupni, reálně nižší, než se jevila termokamerou. Dá se zde předpokládat, že se zde projevila chyba snímání teploty termokamerou. V simulovaném modelu pak byly tyto rezistory a tranzistory zanedbány. Model desky plošných spojů výkonového zesilovače s již zahřátými součástkami, pomocí něž byly dané ztrátové výkony na jednotlivých součástkách zjištěny, je na Obr. 28. Na tomto modelu

je nejvyšší teplota součástek značena sytě červeně, tj. přibližně 39,98 °C, nejnižší pak tmavě modře, přibližně 20,06 °C.



Obr. 28: Model teplotního pole DPS výkonového zesilovače

Pomocí termokamery byla změřena i teplota na zahřátém chladiči koncových tranzistorů výkonového zesilovače, viz Obr. 27. Toto měření teploty bylo provedeno pouze orientačně, aby se potvrdilo, že po odečtení ztrátových výkonů součástek na desce plošných spojů od celkového ztrátového výkonu výkonového zesilovače, byl ztrátový výkon na koncových tranzistorech přibližně stejný jako ve skutečnosti. Na Obr. 27 zobrazená minimální teplota chladiče není úplně správná, její nesprávná hodnota byla způsobená chybou snímání termokamery, pravděpodobně z důvodů že byl použit hliníkový chladič s některými leštěnými plochami. Ve skutečnosti nebylo možné chladič udržet v ruce. Teplota naměřená na samotných tranzistorech však odpovídá teplotě v modelu chladiče na Obr. 29, kde je nejvyšší teplota značena sytě červeně, tj. přibližně 72,34 °C a nejnižší teplota tmavě modře, tj. přibližně 72,40 °C. Rozměry použitého hliníkového chladiče koncových tranzistorů jsou 250 x 90 x 25 mm.



Obr. 29: Model teplotního pole chladiče koncových tranzistorů

Ztrátové výkony na všech výše popsaných součástkách, použité v následující simulaci chlazení zesilovače jsou shrnuty v tabulce Tab. 7.

Tab. 7: Tabulka ztrátových výkonů jednotlivých součástek

Součástka	Ztrátový výkon [W]
Koncový tranzistor	18,48
Emitorový rezistor koncového tranzistoru	0,76
Tranzistor v řídicím stupni	0,8
Tranzistor ve druhém stupni	0,5
Transformátor	16

7.3 Nastavení simulací v SW Flow Simulation

Před provedením samotných simulací byly v úvodním nastavení nástroje SolidWorks Flow Simulation nastaveny základní parametry simulace, které jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 8.

Tab. 8: Základní nastavení simulace

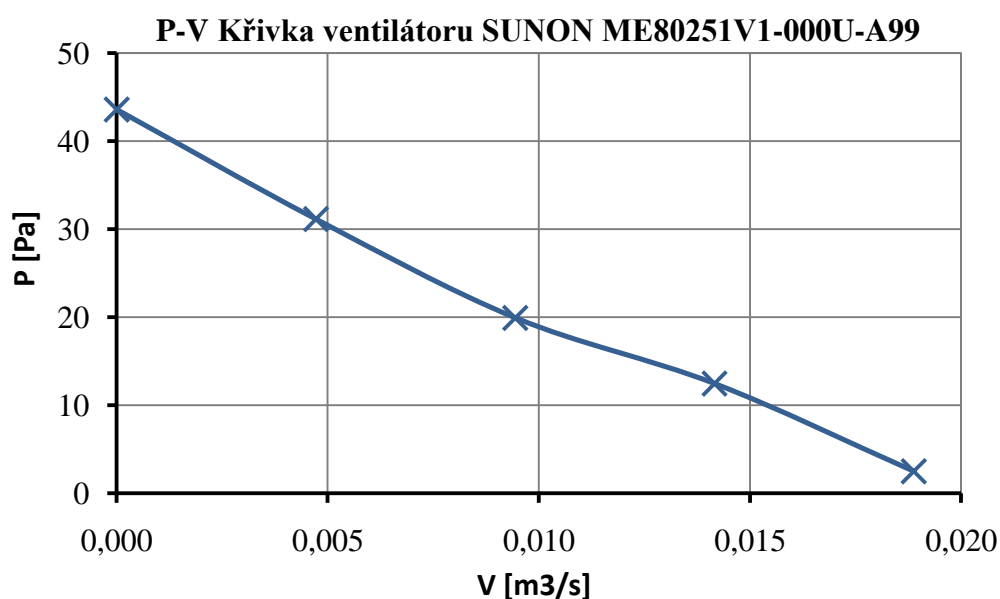
Jméno projektu	Chlazení zesilovače
Jednotkový systém	SI Změna jednotky teploty z K na °C
Typ analýzy	Interní Vyloučení dutin z výpočetní domény
Fyzické vlastnosti	Přenos tepla v pevných látkách a okolí Gravitace v ose Z = -9,81 m/s ²
Výchozí tekutina	Vzduch (plyn)
Výchozí pevná látka	Ocel (běžná)
Stěnové podmínky	Chování vnějších stěn k okolí Koeficient přenosu tepla 8 W/m ² K ⁻¹
Počáteční a okolní podmínky	Ponechány beze změny (nulové počáteční rychlosti proudění, teplota v modelu 20,05 °C)

Po provedení základního nastavení simulace byly zadány materiály jednotlivých komponent zesilovače, jenž byly vyrobeny z jiného materiálu než zadaný výchozí materiál (ocel) v základním nastavení simulace. Zadané materiály komponent zesilovače jsou včetně jejich tepelné vodivosti uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9: Materiály jednotlivých komponent zesilovače

Materiál	Součást	Tepelná vodivost [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
Hliník	Chladiče	229
Izolační materiál	Záslepky modelu	0
Keramika	Emitorové rezistory koncových tranzistorů	18
Měď	Transformátory	395
FR4	Materiál desek plošných spojů	X,Y - 0,5; Z - 0,3
Materiál pouzder	Pouzdra IO	X,Y - 5; Z - 20
Leštěná ocel	Pouzdra koncových tranzistorů	51,9

Jelikož se při všech simulacích chlazení zesilovače jednalo o interní analýzu (simulace byly prováděny v uzavřeném objektu), bylo nutné všechny ventilační otvory „zaslepit“. Celý model zesilovače musel tak být vodotěsný, jinak by simulační program nebyl schopen přesně určit v jaké oblasti má dané výpočty řešit. Všude, kde byly v modelu použity záslepky (ventilační otvory, vstupy a výstupy ventilátorů), byla na jejich vnitřní ploše nastavena podmínka výtoku proudění směrem do atmosféry (u ventilačních otvorů), nebo nastaven ventilátor s definovanou P-V křivkou. Ta udává, jak se ventilátor chová při různém tlaku ventilátorem vyfukovaného vzduchu, jenž závisí například na umístění pevně překážky, bránící proudění vzduchu před ventilátor. P-V křivka použitých ventilátorů SUNON ME80251V1-000U-A99 [24] je uvedena na Obr. 30. Pro tyto již zmiňované záslepky byl použit materiál v systému SolidWorks nazvaný insulator. Tento materiál není reálným materiálem, má totiž nulovou tepelnou vodivost a tak se na přesunu tepla nepodílí.



Obr. 30: P-V křivka použitých ventilátorů v zesilovači [24]

V těch simulacích chlazení zesilovače, kde v modelované skříni zesilovače nebyly na některých nebo žádných, pro ventilátory určených, otvorech dané ventilátory umístěny, byly tyto otvory zaslepeny stejným materiálem jako vymodelovaná skříň zesilovače. Pro danou simulaci se tedy chovaly jako neprůchozí.

V dalším kroku nastavení simulace byly zadány ztrátové výkony jednotlivých součástek produkující teplo, viz tabulka Tab. 7 v kapitole 7.2

Posledním nastavením simulace bylo nastavení konvergenčních kritérií ve výpočtu, v SolidWorks Flow Simulation uvedených jako Goals, nebo taktéž přeloženo cílů výpočtu, jejichž opakovanou kontrolou je hlídán konec výpočtů. Při výpočtech jsou řešeny parciální diferenciální rovnice pro proudění, viz kapitola 4.1, v iteračním tvaru. Samotná kontrola konvergence pak má za úkol hlídat neměnnost výsledků výpočtů prováděných simulací. Pokud ve dvou na sebe navazujících iteracích dojde k minimální změně výsledků, je provedeno ještě několik kontrolních iterací a pokud se ani tehdy jednotlivé výsledky od sebe neliší, je výpočet považován za dokončený.

Při simulacích chlazení zesilovače byly v jeho geometrickém modelu sledovány maximální dosažené teploty na jednotlivých součástkách, aby bylo možné vyhodnotit, k jak velké změně dojde při různých variantách chlazení a dále jestli důsledkem příliš vysoké teploty nedojde náhodou k jejich poškození nebo zničení.

Dalšími sledovanými veličinami byla rychlost proudění tekutiny, tlaku a objemového toku plochami, jež byly utěsněny již zmiňovanými záslepkami. Skrze plochy záslepek odchází teplo z modelu zesilovače ven pomocí proudění. Po ustálení hodnot těchto sledovaných veličin, je i proudění považováno za ustálené.

Po provedení všech těchto nastavení simulace byl spuštěn samotný výpočet simulace, po jehož dokončení byly v postprocesoru zobrazeny výsledky formou barevných map, grafů, tabulek a vektorových animací, což je rozebráno v následující kapitole.

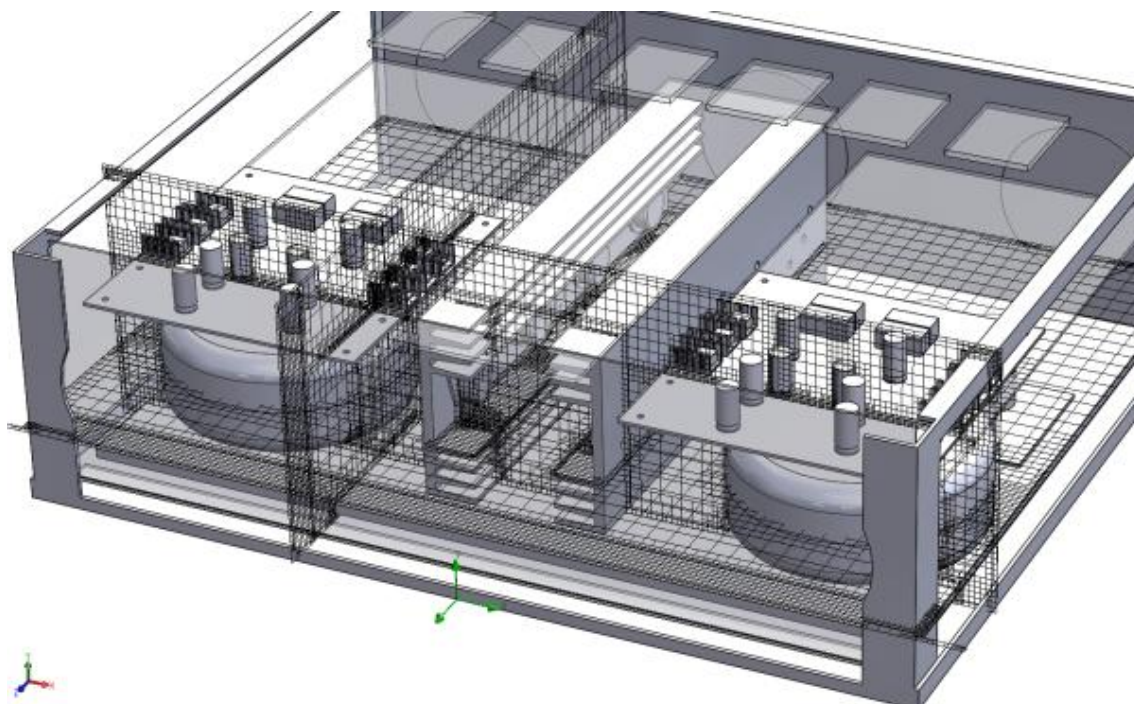
7.4 Simulace chlazení zesilovače

Po nastavení všech parametru simulace, včetně fyzikálních vlastností jednotlivých součástí byla provedena samotná simulace. Po spuštění simulace byla automaticky vygenerována výpočetní síť skládající se z jednotlivých buněk a následně vypočteny požadované parametry simulace. Počet vygenerovaných buněk ve výpočetní síti je pro přehled uveden v Tab. 10.

Tab. 10: Počet vygenerovaných buněk

Buněk celkem	2070506
Buněk v kapalině	1188789
Buněk v pevné látce	881717

Výpočetní síť vygenerovaná při simulaci chlazení zesilovače je uvedena na následujícím obrázku Obr. 31. V následujících podkapitolách jsou popsány čtyři návrhy chlazení zesilovače pomocí simulace. Ostatní simulované návrhy chlazení zesilovače, ve kterých již došlo pouze k minimální změně teplot a proudění uvnitř zesilovače oproti těmto čtyřem základním návrhům chlazení zesilovače, jsou uvedeny na přiloženém DVD.



Obr. 31: Výpočetní síť vytvořená při simulaci chlazení zesilovače

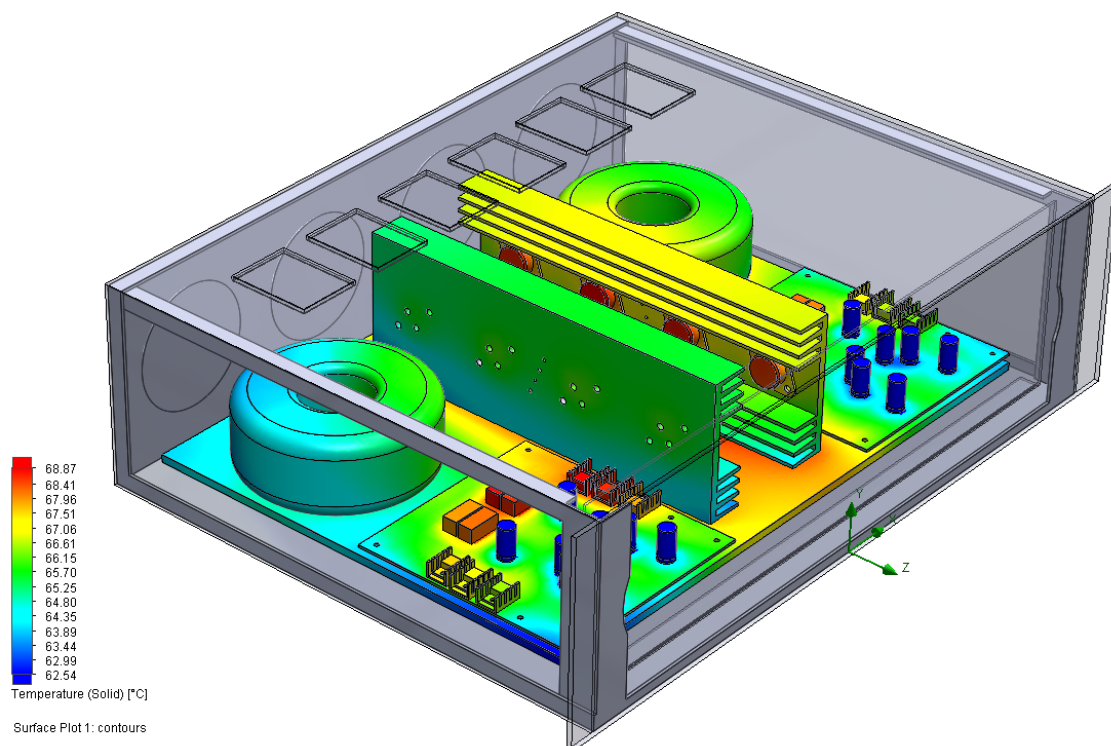
7.4.1 Chlazení bez použití ventilátorů

První simulovanou variantou chlazení zesilovače bylo použití pouze hliníkových chladičů pro chlazení koncových tranzistorů výkonových zesilovačů. Nebyly zde použity žádné ventilátory vhánějící vzduch dovnitř zesilovače nebo naopak odsávající ven. Zesilovač byl v tuto chvíli chlazen pouze přirozenou konvekcí. Rozložení teplot na jednotlivých částech modelu zesilovače je na Obr. 32.

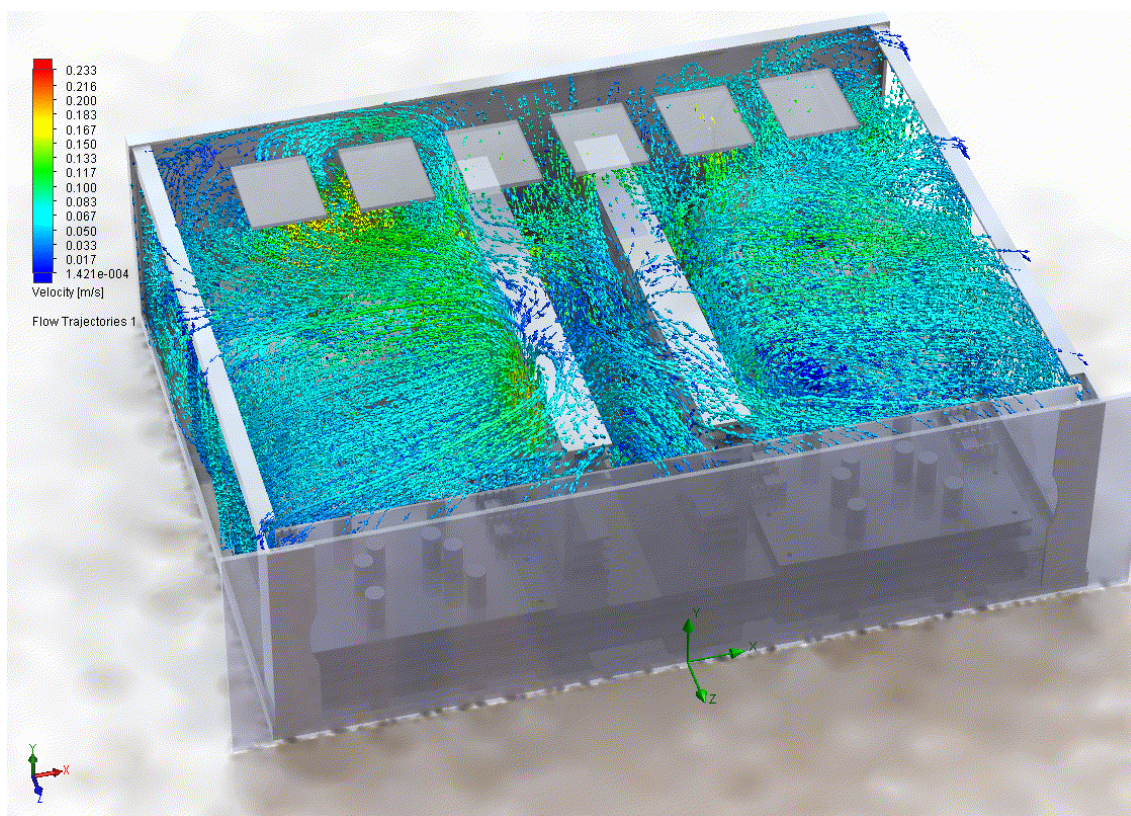
Jak je z tohoto obrázku parné, teplota na všech částech zesilovače umístěných v jeho skříni dosahuje hodnoty vyšší než 62 °C. Chladiče koncových tranzistorů z jedné strany předávají teplo hliníkové podložce, k níž jsou všechny komponenty zesilovače přichyceny. Z toho důvodu je jejich teplota nižší, než naměřená termokamerou na Obr. 27. Na druhou stranu tím dochází skrze podložku k většímu zahřívání ostatních komponent zesilovače.

Uvnitř skříně je přirozené avšak pomalé proudění vzduchu, viz Obr. 33. Většina ohřátého vzduchu cirkuluje uvnitř skříně zesilovače a přispívá tím k ještě většímu zahřívání částí zesilovače, které by měli normálně teplotu mnohem nižší, například deska plošných spojů výkonového zesilovače ve srovnání s naměřenými teplotami

termokamerou na Obr. 26. Pouze malá část ohřátého vzduchu se dostává ven ze skříně zesilovače skrze ventilační otvory. Protože má skříň zesilovače ventilační otvory umístěné pouze na horní straně, nedochází zde ani k tzv. komínovému efektu.



Obr. 32: Rozvržení teplot uvnitř zesilovače bez použití ventilátorů

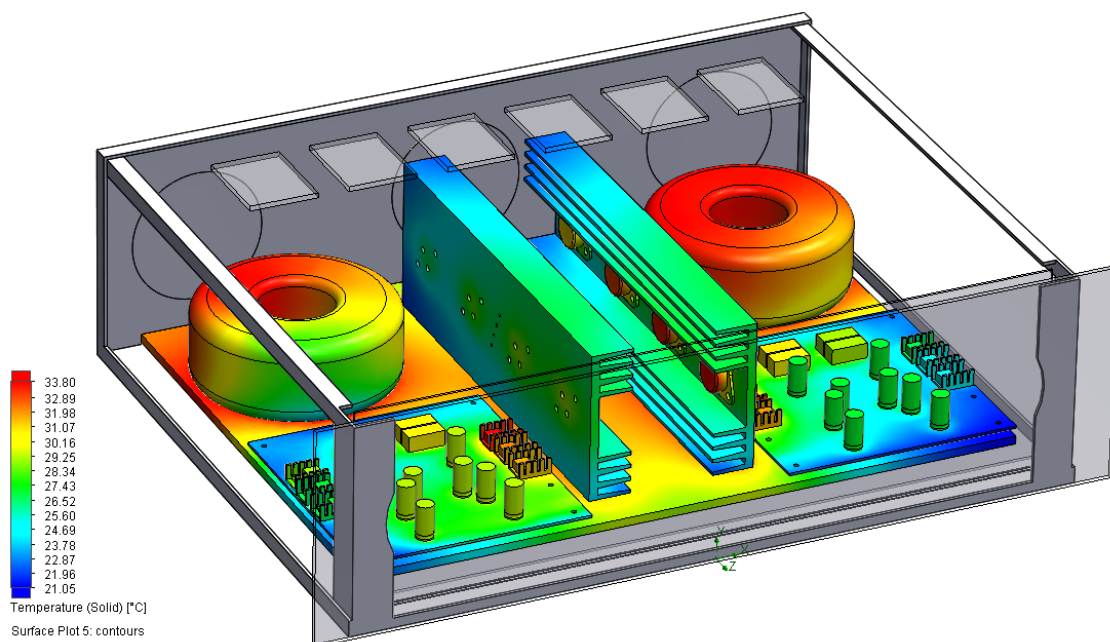


Obr. 33: Proudění vzduchu uvnitř zesilovače bez použití ventilátoru

Výhodou tohoto řešení je prakticky nulový hluk vydávaný zesilovačem, na druhou stranu však teploty jednotlivých částí zesilovače dosahují poměrně vysokých hodnot. Pokud by se vzala do úvahy vyšší teplota okolního vzduchu kolem zesilovače, například v letních měsících, byly by teploty jednotlivých komponent ještě vyšší. Proto byla tato varianta návrhu chlazení zesilovače označena za nedostatečnou

7.4.2 Chlazení s použitím jednoho ventilátoru

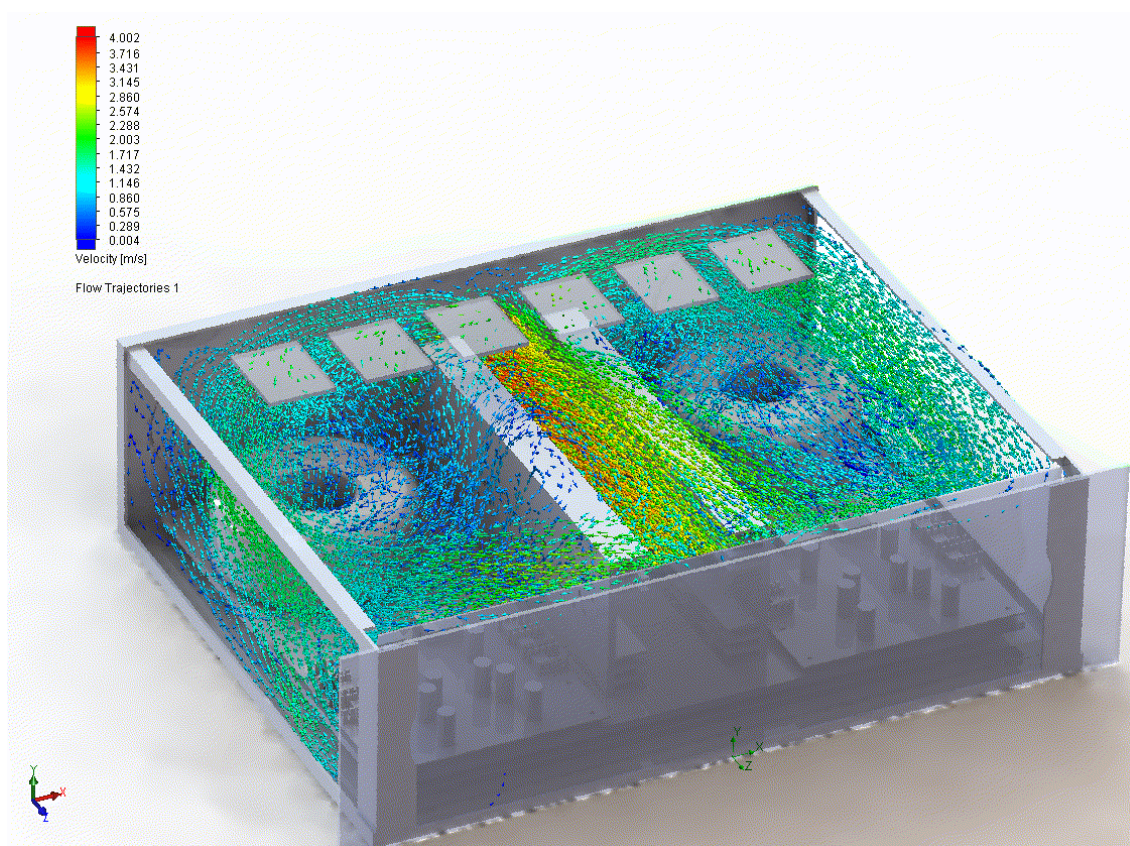
Druhá simulovaná varianta chlazení zesilovače byla s použitím jednoho ventilátoru, který byl umístěn uprostřed zadní stěny skříně zesilovače a foukal studený vzduch dovnitř zesilovače směrem na chladiče koncových tranzistorů výkonového zesilovače. Jak je vidět na Obr. 34, v této variantě chlazení došlo oproti předchozí variantě chlazení bez použití ventilátorů k výraznému poklesu teplot jednotlivých komponent, ve většině případů o více než 30 °C. Nejvyšší teplotu v tomto návrhu chlazení zesilovače mají oba transformátory, v některých místech pak podložka, ke které jsou všechny části zesilovače přichyceny a pouzdra některých tranzistorů, kdy teplota těchto komponent je v průměru 33 °C.



Obr. 34: Rozvržení teplot uvnitř zesilovače při použití jednoho ventilátoru

Pokud jde o samotné proudění vzduchu uvnitř zesilovače, na uvedeném Obr. 35 je patrný proud vzduchu, jenž je vytvářen pomocí ventilátoru. Ventilátor zde fouká studený vzduch z vnějšku přímo na chladiče koncových tranzistorů, čímž je zabezpečeno jejich dobré chlazení. Dále je tento proud vzduchu rozrážen o čelní stěnu zesilovače a následně se vrací kolem desek plošných spojů výkonových zesilovačů a transformátorů zpět do zadní části zesilovače. Zde část onoho již ohřátého vzduchu odchází pryč ze zesilovače přes ventilační otvory a část se připojuje k proudu vzduchu foukaného ventilátorem dovnitř zesilovače. Oproti předešlé variantě je díky

nucené konvekci proudění vzduchu uvnitř zesilovače mnohem rychlejší, viz Obr. 35. Opět zde probíhá cirkulace vzduchu uvnitř zesilovače, ale v mnohem menší míře, než v předchozí variantě. Díky tomu se části zesilovače, které by jinak měly nižší teplotu, vlivem proudění teplého vzduchu tolik nezahřívají.

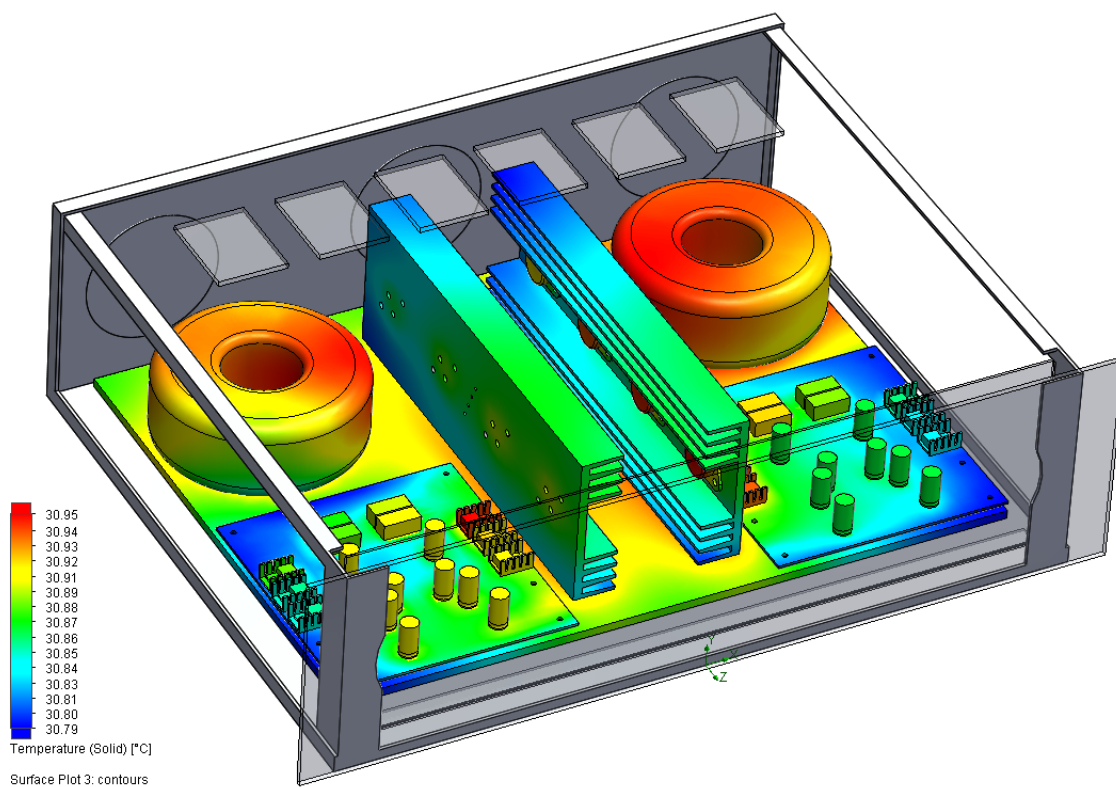


Obr. 35: Proudění uvnitř zesilovače při použití jednoho ventilátoru

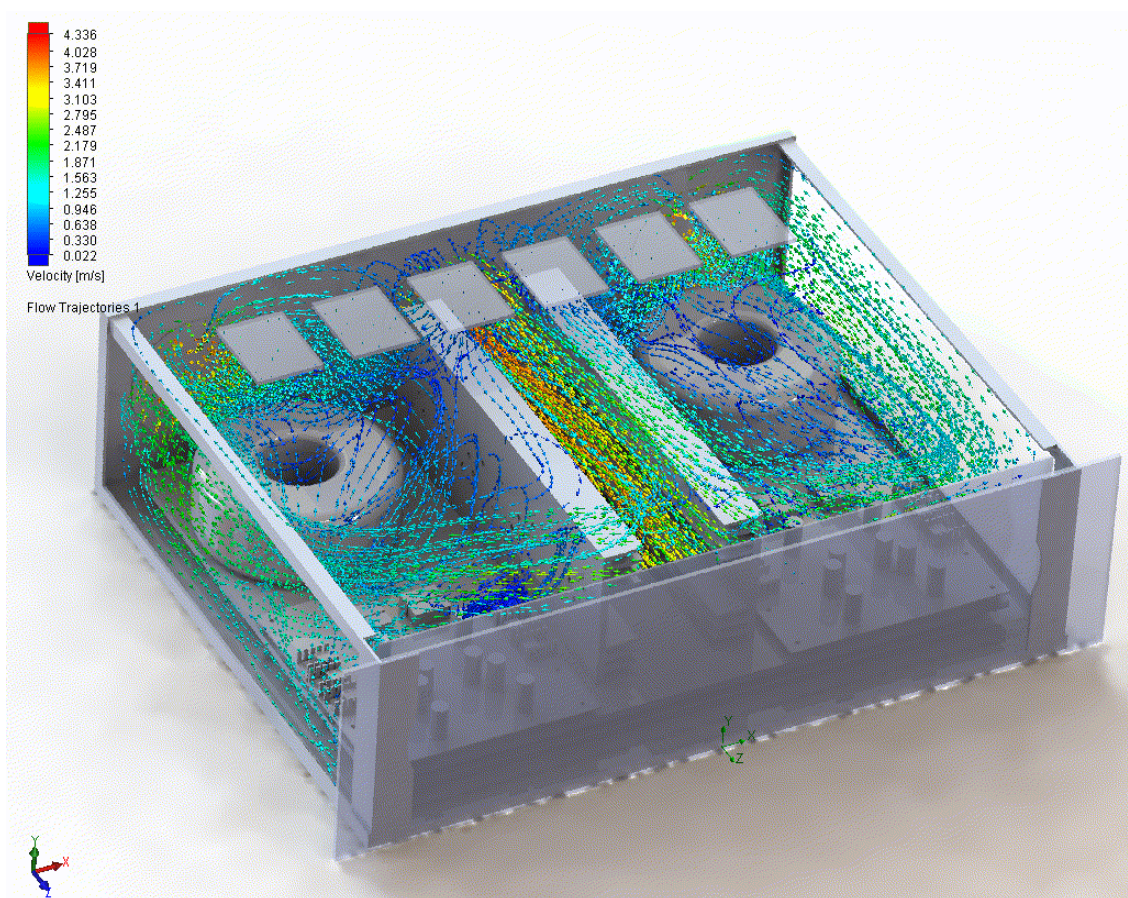
7.4.3 Chlazení s použitím tří ventilátorů

V následující simulované variantě chlazení byly přidány další dva ventilátory, které vyfukovaly ohřátý vzduch ven zevnitř zesilovače. Ty byly umístěny na pravou a levou část zadní strany skříně zesilovače. Přidáním těchto dvou ventilátorů došlo k dalšímu snížení maximální teploty a dále pak k částečnému vyrovnání teplot na všech částech zesilovače uvnitř jeho skříně, kdy teplota všech částí zesilovače byla přibližně 30,9 °C, viz Obr. 36.

Přidání dalších dvou ventilátorů vyfukující teplý vzduch ven ze zesilovače mělo taktéž pozitivní vliv na proudění vzduchu uvnitř zesilovače. Jak je z Obr. 37 patrné, již nedochází k cirkulaci vzduchu uvnitř zesilovače a samotné proudění je taktéž v porovnání s variantou s jedním ventilátorem o něco rychlejší. Nevýhodou však je, že oba ventilátory, jejichž úkolem je vyfukovat teplý vzduch zevnitř zesilovače, vyfukují i studený vzduch, který nasávají skrze ventilační otvory na horní straně skříně zesilovače.



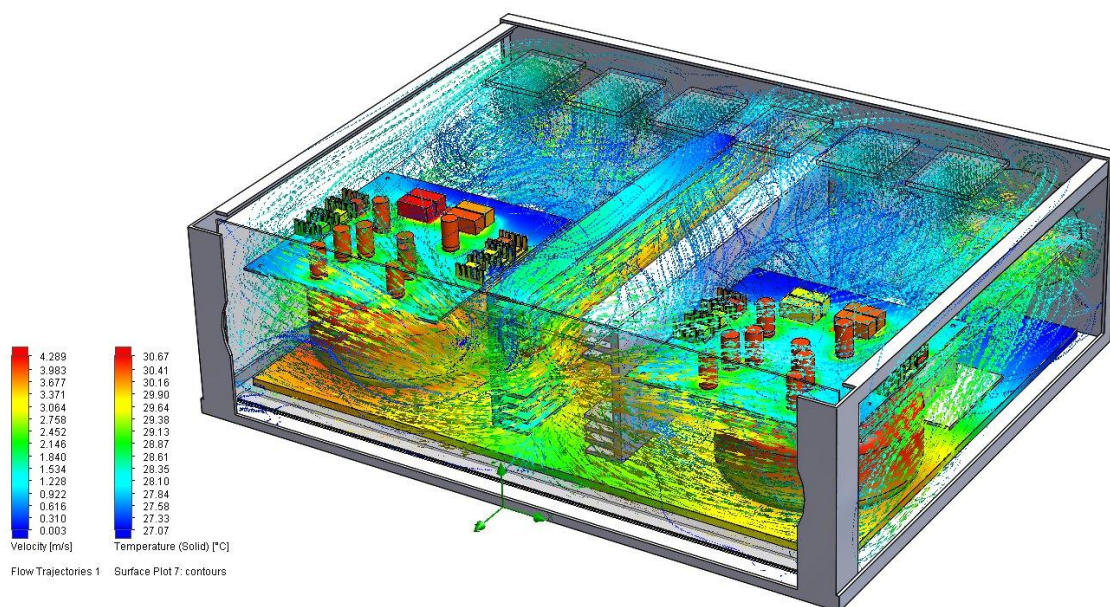
Obr. 36: Rozvržení teplot uvnitř zesilovače při použití tří ventilátorů



Obr. 37: Proudění uvnitř zesilovače při použití tří ventilátorů

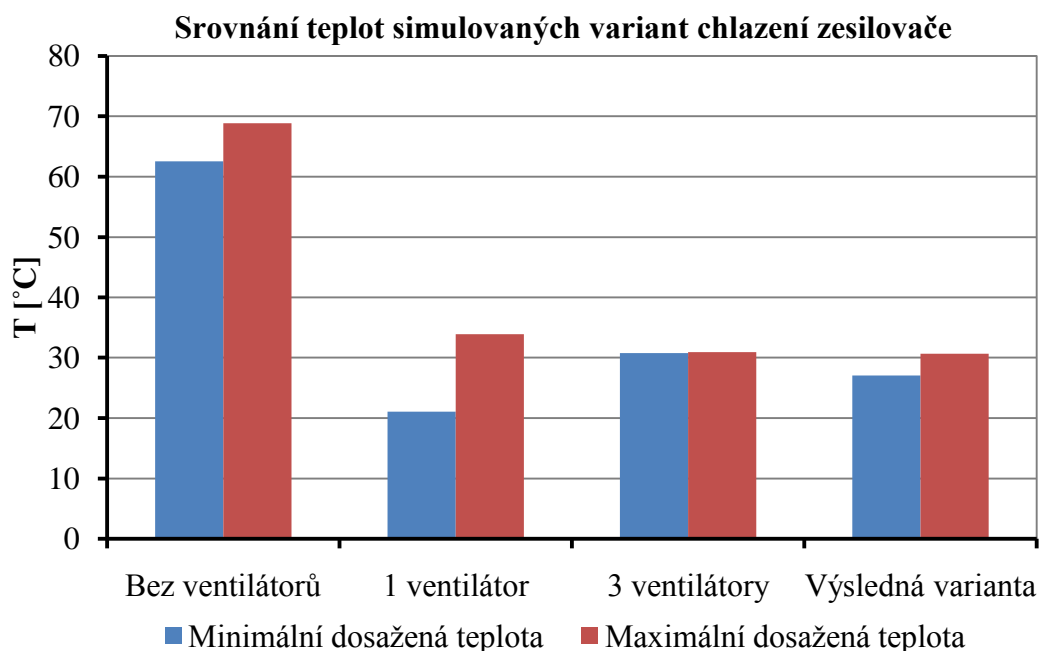
7.4.4 Výsledná varianta chlazení zesilovače

Výsledná varianta chlazení zesilovače vznikla úpravou předešlé varianty chlazení se třemi ventilátory. Došlo zde ke změně rozmístění jednotlivých komponent a taktéž k rozdělení vnitřní části zesilovače do dvou výškových úrovní, protože by se další součásti zesilovače, které nejsou v důsledku zjednodušení geometrického modelu zesilovače vymodelovány, do skříně zesilovače již nevešly, viz Obr. 38. Oba transformátory byly přemístěny ze zadní části skříně zesilovače do přední, aby jimi nebyly ucpány ventilátory odvádějící teplý vzduch ven zevnitř zesilovače. Mezera mezi oběma chladiči koncových tranzistorů výkonových zesilovačů byla z horní strany přikryta hliníkovým plechem, čímž se vytvořil tzv. tunel. Jak je vidět z Obr. 38 maximální dosažené teploty dosažení uvnitř zesilovače se výrazně nezměnili. Jsou zde sice již větší rozdíly teplot než v předešlé variantě chlazení, ale ani tento rozdíl není nikterak kritický. Nejvyšší teplota uvnitř skříně zesilovače značená sytě červenou barvou je 30,67 °C, nejnižší teplota značená tmavě modrou barvou je pak 27,07 °C. Pokud jde o proudění vzduchu uvnitř zesilovače, vlivem změny rozmístění jednotlivých částí zesilovače se zde v zadní části zesilovače tvoří větší množství vírů.



Obr. 38: Tepelné pole a proudění vzduchu ve výsledném návrhu chlazení

Na následujícím obrázku Obr. 39 je grafické srovnání maximálních a minimálních teplot uvnitř zesilovače v jednotlivých uvedených variantách návrhu jeho chlazení. Z tohoto srovnání vyplývá, že z uvedených variant, co se týče maximálních teplot, je výsledná varianta nejvýhodnější.



Obr. 39: Srovnání jednotlivých variant navrženého chlazení

I přesto, že se varianta chlazení s jedním ventilátorem z Obr. 39 jeví také jako dobrá volba hlavně z důvodu nižší minimální teploty, v případě že by byla tato varianta použita při stejném rozmístění součástí zesilovače jako ve výsledné variantě a navíc by byly do zesilovače přidány všechny jeho součásti, které byly v jeho geometrickém modelu zanedbány, ventilátor by nebyl schopen uvnitř zesilovače vytvořit takové proudění, aby byly všechny potřebné součásti zesilovače proudícím vzduchem ochlazovány. V tomto důsledku by proto byla i teplota jednotlivých součástí uvnitř zesilovače vyšší než v simulaci. Navíc v geometrickém modelu byly zanedbány všechny vodiče, které propojují jednotlivé části zesilovače, protože o jejich přesném umístění uvnitř skříně zesilovače bylo rozhodnuto až při mechanickém sestavení zesilovače. Jenom tyto samotné vodiče vytváří bariéru proti průchodu vzduchu. Právě díky tomuto důvodu bylo uspořádání jednotlivých částí zesilovače ve finální variantě chlazení s použitím třech ventilátorů zvoleno jako optimální.

Další simulované varianty chlazení zesilovače, které již měli zanedbatelný vliv na teploty a proudění vzduchu uvnitř zesilovače oproti čtyřem zde popsaným variantám chlazení, jsou uvedeny na přiloženém DVD.

8 Sestavení zesilovače

Všechny části zesilovače byly umístěny do skříně s rozměry 435 x 348 x 128 mm. Oba chladiče koncových tranzistorů výkonových zesilovačů Leach jsou umístěny uprostřed skříně a tvoří tzv. chladicí tunel, jenž je z horní strany uzavřen hliníkovou deskou, čímž se usměrní tok vzduchu chladícího tranzistory. Na fotografii, viz Obr. 40, z průběhu sestavování zesilovače tento plech ještě chybí. Celý zesilovač je pak rozdělen na dvě výškové úrovně viz Obr. 40, z nichž horní je vytvořena pomocí distančních sloupků a hliníkových plechů. Ve spodní úrovni jsou umístěny oba toroidní transformátory a všechny části patřící k napájecím zdrojům. V horní úrovni jsou pak umístěny samotné výkonové zesilovače, ochrany reproduktorů, řízení ventilátorů a indikátory vybuzení.

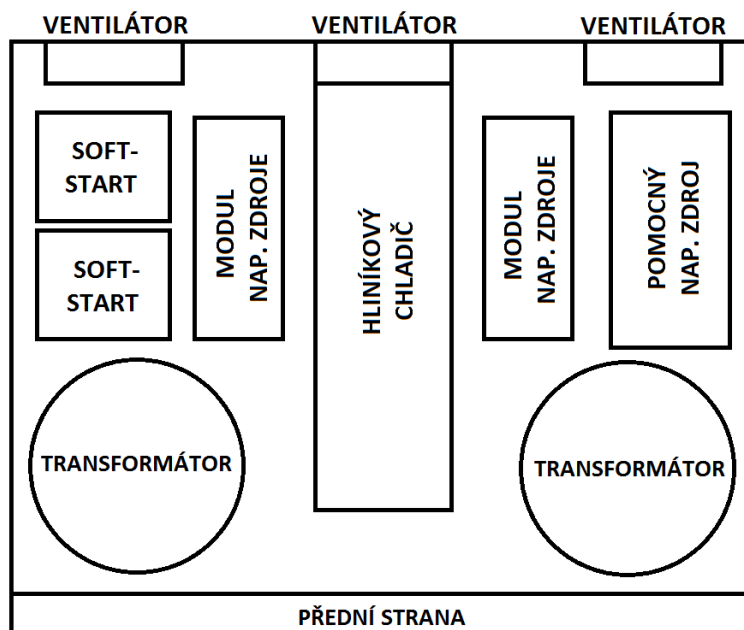


Obr. 40: Fotografie zesilovače z průběhu jeho sestavování

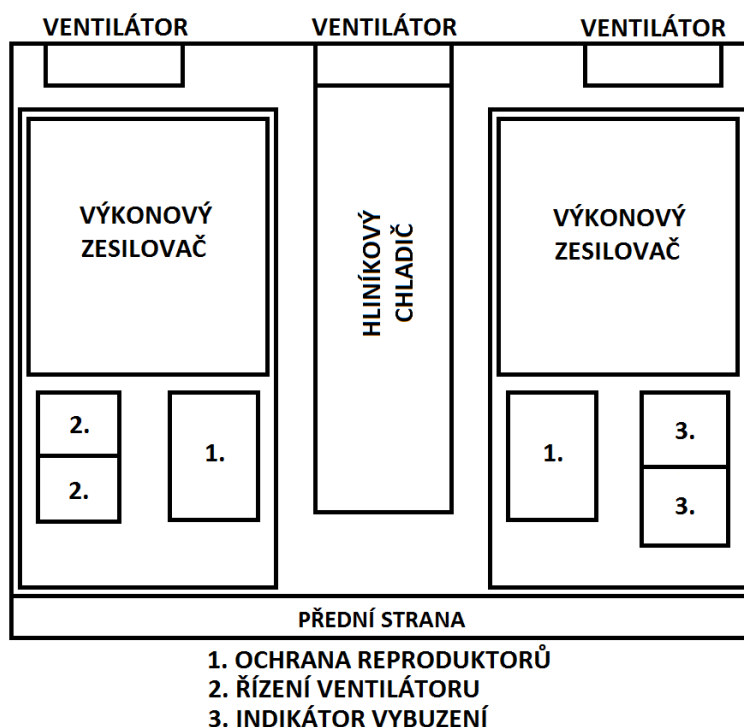
Na fotografii na Obr. 40 je skříň zesilovače vyfocena ještě předtím, než byly připevněny komponenty do její zadní strany a bez předního panelu. V zadní straně skříně byly umístěny jednotlivé vstupy a výstupy zesilovače, napájecí zásuvka, vypínač a tři ventilátory, z nichž krajní dva vzduch ze zesilovače odvádí a prostřední jej do zesilovače vhání. Na předním panelu zesilovače byly umístěny pouze ručičkové VU metry a potenciometr pro regulaci hlasitosti. Podrobnější schéma rozmístění jednotlivých částí v obou úrovních zesilovače je na Obr. 41 a Obr. 42.

Jednotlivých částí zesilovače byly uvnitř jeho skříně rozmístěny s drobnými změnami obdobně jako v simulaci chlazení ve finální variantě navrženého chlazení,

avšak dané drobné změny v rozmístění mají zanedbatelný vliv na teploty jednotlivých součástek a chladičů a na celkové chlazení zesilovače.



Obr. 41: Rozmístění jednotlivých částí zesilovače ve spodní úrovni.



Obr. 42: Rozmístění jednotlivých částí zesilovače v horní úrovni.

Největší změnou oproti již zmiňované finální variantě bylo posunutí výkonových zesilovačů směrem k zadní straně zesilovače pro případ, že by magnetická pole transformátorů měla vliv na funkci výkonových zesilovačů. Další změnou pak bylo drobné přeskupení jednotlivých částí napájecích zdrojů ve spodní úrovni.

Jak je vidět z Obr. 42 celkem jsou použity 3 ventilátory. Jeden modul řízení ventilátoru je schopen regulovat otáčky i dvou ventilátorů k němu připojených paralelně. Jeden modul řízení ventilátorů proto obstarává regulaci otáček prostředního ventilátoru, který dovnitř zesilovače vzduch vhání. Druhý pak reguluje otáčky zbylých dvou ventilátorů, které vzduch zevnitř zesilovače odvádí.

8.1 Ekonomické zhodnocení stavby zesilovače

Návrh a výroba každého zařízení si vyžaduje určité investice a to jednak ve formě stráveného času při samotné výrobě zařízení, ale taktéž ve formě finanční. Stejně tak si své investice vyžádala i konstrukce a výroba dvoukanálového výkonového audio zesilovače, jemuž se věnuje tato bakalářská práce.

Co se finanční stránky týče, pouze součástky potřebné na výrobu jednotlivých částí zesilovače vyšly přibližně na 4000 Kč avšak s tím, že některé potřebné součástky nebylo třeba kupovat, protože byly již před samotným návrhem zesilovače k dispozici. Dále je třeba uvážit, že k dispozici taktéž byly v předchozích kapitolách několikrát zmíněné transformátory, chladiče koncových tranzistorů výkonových zesilovačů, ventilátory a skříň zesilovače. Pokud by však dispozici nebyly, znamenalo by to výdaje ve výši přibližně dalších 4000 Kč. Dalšími zakoupenými položkami byl elektroinstalační, spojovací a hutní materiál a další příslušenství potřebné pro výrobu zesilovače. Je třeba taky podotknout, že desky plošných spojů všech částí zesilovače byly vyrobeny ve školních laboratořích. V tabulce Tab. 11 je uveden přehled přibližných cen všeho materiálu, který byl na zesilovač použit. Ty položky, jež jsou červeným písmem, nebylo potřeba při výrobě zesilovače uvedeného v této bakalářské práci kupovat. Dále v tabulce uvedená přibližná cena potřebného materiálu je cena materiálu, který byl zakoupen pro realizaci zesilovače v této bakalářské práci. Přibližná cena materiálu celkem pak značí celkovou cenu materiálu včetně položek, které byly při výrobě k dispozici a nemusely se tak kupovat.

Tab. 11: Přehled cen materiálu potřebného ke stavbě zesilovače

Materiál	Cena [Kč]
Elektronické součástky	4000
Hutní materiál	400
Spojovací materiál	300
Elektroinstalační materiál	500
Příslušenství	700
Skříň zesilovače	900
Hliníkové chladiče	700
Transformátory (2 kusy)	1900
Ventilátory	450
Přibližná cena potřebného materiálu	5900
Přibližná cena materiálu celkem	9850

Pokud by se mimo tuto bakalářskou práci měl daný zesilovač vyrábět a musel by být všechen výše jmenovaný materiál pro jeho stavbu zakoupen, bylo by na zvážení, zdali se vzhledem k cenám komerčně vyráběných zesilovačů do výroby tohoto zesilovače pouštět. Komerčně vyráběné zesilovače od renomovaných výrobců s dle katalogů ekvivalentními parametry se nejčastěji pohybují v cenové relaci mezi 8 až 15 tisíci korun. [25] Příkladem může být Hi-Fi zesilovač YAMAHA A-S501 jenž v internetovém obchodě alza.cz stojí ke 2. 6. 2017 necelých 13 tisíc korun. [25] Navíc nespornými výhodami koupe zesilovače je například propracovaný design přístroje či záruka. Pokud by však byl k potřebné částce pro nákup materiálu přičten i potřebná čas na výrobu zesilovače, je spíše lepší volbou si koupit již hotový zesilovač. Nespornou výhodou svépomocí vyrobeného zesilovače je však jistota v parametrech, kterými zesilovač disponuje a taktéž dále například možnost předimenzování jeho součástí.

9 Závěr

V této bakalářské práci byl navržen a zkonstruován dvoukanálový audio zesilovač, který se skládá z výkonového zesilovače typu Leach [16], napájecího zdroje, ochrany reproduktorů, která má za úkol chránit reproduktory před poškozením, indikátoru vybuzení a řízení otáček ventilátoru v závislosti na teplotě. Protože se jedná o dvoukanálový zesilovač, jsou všechny tyto části v zesilovači zdvojeny a to včetně zdrojů, protože bylo nutné použít dva transformátory. Dále byl zesilovač doplněn o pomocný napájecí zdroj, kterým jsou napájeny indikátory vybuzení a řízení otáček ventilátorů v závislosti na teplotě, jelikož tyto dvě části zesilovače potřebují mnohem nižší napájecí napětí, než jakým disponují napájecí zdroje výkonových zesilovačů.

Zmiňovaný výkonový zesilovač typu Leach byl použit především kvůli svým široce známým velmi dobrým parametrům. V této práci bylo u výkonového zesilovače změřeno zkreslení zesilovače v závislosti na frekvenci a výstupním výkonu, kmitočtová charakteristika, účinnost a výstupní výkon zesilovače, viz kapitola 6. Co se týče zkreslení zesilovače, byly naměřené výsledky podmíněny možnostem měřících přístrojů. Měření bylo provedeno pomocí osciloskopu UNI-T UTD2052CEL v režimu rychlé Fourierovi transformace (FFT). Jednotlivé vyšší harmonické složky výstupního napětí zesilovače, jenž byly výsledkem jeho zkreslení, však byly natolik malé, že je bylo velmi obtížné odlišit od šumu, který byl spolu s nimi zobrazován na osciloskopu. Měření zkreslení proto bylo jen velmi orientační, protože v mnoha případech místo vyšších harmonických složek byly odečítány nejvyšší složky šumu. Reálné zkreslení výkonového zesilovače však bude menší, než naměřené, tj. menší, než naměřené hodnoty zkreslení z rozmezí 0,1 až 0,35 %, a to jak u měření zkreslení v závislosti na frekvenci, tak i na výstupním výkonu zesilovače. Jedinou výjimkou však je naměřené zkreslení zesilovače při jeho maximálním výstupním výkonu, kdy již bylo vlivem saturace zesilovače jeho výstupní napětí „ořezáno“. Při měření výstupního výkonu pak bylo potvrzeno, že se navržený zesilovač skutečně hodí k použití zamýšlených reproduktorů s impedancí $8\ \Omega$ a maximálním trvalým výkonem 100 W, protože výkonový zesilovač je schopen při použitém napájecím napětí $\pm 40,1\text{ V}$ dodávat do této zátěže přibližně 78,5 W. Dále bylo měřením zjištěno, že maximální ztrátový výkon zesilovače, získaný měřením při zátěži o velikosti $4\ \Omega$, činí přibližně 80,5 W. Bližší rozbor naměřených hodnot je popsán v kapitole 6.

S ohledem na naměřený maximální ztrátový výkon přeměněný na výkonovém zesilovači na teplo bylo pomocí návrhového systému SolidWorks a jeho nástroje Flow Simulation navrženo ekvivalentní chlazení zesilovače. Zde byl nejprve vytvořen zjednodušený geometrický model celého zesilovače včetně skříně, do které byly při konečném sestavení jeho jednotlivé části umístěny. Geometrický model zesilovače byl zjednodušen s ohledem na čas potřebný k výpočtu, ale taktéž s ohledem na to, aby nemělo zjednodušení modelu na výsledky simulací pokud možno žádný vliv. Ztrátové výkony jednotlivých součástí na desce plošných spojů (DPS) výkonového

zesilovače potřebné pro simulaci chlazení byly určeny experimentálně simulací teplotního pole na této DPS, které bylo porovnáváno s fotografií teplotního pole pořízenou termokamerou při maximálním zahřátí PDS při měření parametrů výkonového zesilovače.

Pomocí nástroje SolidWorks Flow Simulation bylo simulováno teplotní pole a proudění uvnitř zesilovače. V této práci byly uvedeny čtyři varianty chlazení, přičemž další simulované varianty, při kterých již nedocházelo k velkým změnám v proudění a teplot na jednotlivých součástkách, jsou uvedeny na přiloženém DVD. Nejprve byla simulována varianta chlazení, kde byl použit pouze hliníkový chladič koncových tranzistorů výkonového zesilovače, bez použití ventilátorů. Tato varianta se ukázala jako nedostatečná z důvodu vysokých teplot, které dosahovali hodnot 62 °C až 68 °C. Další variantou bylo použít ventilátoru, který na tento chladič foukal studený vzduch a tím jej ochlazoval. Při této variantě došlo k výraznému snížení teplot, kdy maximální teplota dosahovala 34 °C, nebylo zde však zcela optimální proudění vzduchu, protože jeho část neustále ve skříni zesilovače cirkulovala. Následně byla simulována varianta se třemi ventilátory, kdy dva odváděly teplý vzduch ze zesilovače ven. V této variantě chlazení došlo k dalšímu poklesu teploty přibližně o 3 °C a zlepšení proudění vzduchu uvnitř skříně zesilovače. Výsledná simulovaná varianta chlazení byla upravenou variantou chlazení se třemi ventilátory, kdy bylo změněno rozmístění jednotlivých částí zesilovače uvnitř skříně, byly vytvořeny dvě výškové úrovně uvnitř zesilovače kvůli potřebě umístit dovnitř skříně velké množství součástí zesilovače a pomocí plechu a obou chladičů koncových tranzistorů obou výkonových zesilovačů byl vytvořen tzv. tunel. I přesto že se jevila varianta s jedním ventilátorem jako dostatečná, byly nakonec použity tři ventilátory, protože při simulaci byl model zjednodušen a navíc nebylo počítáno například s tím, že bude uvnitř skříně umístěno poměrně velké množství vodičů, které budou určitým způsobem bránit proudění vzduchu.

Podle výsledné varianty navrženého chlazení byl poté zesilovač s drobnými změnami sestaven. Jak z cenové kalkulace vyplývá, celková cena všeho potřebného materiálu na sestavení zesilovače v této bakalářské práci byla přibližně 5900 Kč, avšak řadu materiálu a komponent nebylo třeba kupovat, protože již byla k dispozici. Pokud by však měl být popisovaný zesilovač sestaven mimo tuto práci, bylo by na uvažovanou, zdali si za cenu materiálu nekoupit již hotový komerčně prodávaný zesilovač. Tato problematika byla více rozebrána v kapitole 7.1.

Literatura

- [1] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [2] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače 1: předzesilovače*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 807300030X.
- [3] Zesilovače - vlastnosti a parametry. *Www.audioweb.cz* [online]. 2012 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.audioweb.cz/viewtopic.php?id=15671>
- [4] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače 3: Tranzistorové výkonové zesilovače*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 8073000652.
- [5] CHRISTEN, Jiří. *Návrh stereo audio výkonového zesilovače spínané třídy* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/9942>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Lubomír Brančík.
- [6] DUŠEK, Tomáš. *Třídy zesilovačů* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?632&tridy_zesilovacu
- [7] *Třídy NF zesilovačů* [online]. 2002 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.zesilovace.cz/15830/>
- [8] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [9] VYROUBAL, Petr a Jiří MAXA. *Trojrozměrné modelování a simulace MTMS* [skripta]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2017-05-24].
- [10] Reynoldsovo číslo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo
- [11] *SOLIDWORKS Flow Simulation 2015: Technical Reference* [Příručka, součástí softwaru SolidWorks Flow Simulation]. 2015 [cit. 2017-05-27].
- [12] Chlazení počítače. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chlazen%C3%AD_po%C4%8D%C3%ADta%C4%8De#Aktivn.C3.AD_chlazen.C3.AD
- [13] *SolidWorks - 3D CAD navrhování* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/solidworks/>

- [14] *Balíčky 3D CAD řešení* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.solidworks.cz/produkty/3d-cad/balicky/>
- [15] *SolidWorks Flow Simulation* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/solidworks-flow-simulation/>
- [16] W. Marshall Leach, Jr., Professor. *THE LEACH AMP* [online]. 2000 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://leachlegacy.ece.gatech.edu/lowtim/>
- [17] VORÁČEK, V. Koncové zesilovače: Koncový zesilovač LEACH AMP 200W/4 Ω . *A Radio: Amatérské Radio Řada B - pro konstruktéry*. AMARO spol s.r.o., 2003, **LII/2003**(6), 9.
- [18] ŠRAJER, Milan. Nf koncový zesilovač Leach Amp. In: *Milan Šrajer* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: http://www.milansrajer.cz/projekty/leach_amp/
- [19] RELRAS2415. *GM electronic* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/rellras2415>
- [20] BARTÁČEK, Jiří. Indikátor vybuzení. In: *Bartacek.eu* [online]. 2014 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://bartacek.eu/index.php/elektronika/konstrukce/92-indikator-vybuzeni>
- [21] Regulace otáček ventilátoru. *Pavouk* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.pavouk.org/hw/fan/regul.html>
- [22] Soft start XMX1152. *Elektronika Zdeněk Krčmář* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: http://www.ezk.cz/stavebnice_moduly/xmx1152.htm
- [23] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru*. Brno, 2005.
- [24] *Katalogový list ventilátorů SUNON* [online]. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: http://www.sunon.com/tw/products/pdf/DCFAN/ME8025_U.pdf
- [25] *Zesilovač YAMAHA A-S501* [online]. [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/yamaha-a-s501-stribrny-d4421672.htm?catid=18851360>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

A_P	[dB]	výkonové zesílení
A_U	[dB]	napěťové zesílení
c	[J·kg·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
C	[F]	kapacita
d	[m]	průměr
f	[Hz]	frekvence
F_g	[N]	tíhová síla
h	[J·kg]	statická entalpie
H	[J]	entalpie
I	[A]	elektrický proud
K, THD	[%]	činitel harmonického zkreslení
L	[H]	indukčnost
m	[kg]	hmotnost
P	[W]	tepelný tok, výkon, tlak
P_{JMEN}	[W]	jmenovitý výstupní výkon zesilovače
P_{VST}	[W]	vstupní výkon zesilovače
$P_{VÝST}$	[W]	výstupní výkon zesilovače
P_{ZTR}	[W]	ztrátový výkon na zesilovači
q	[W·m ⁻²]	hustota tepelného toku
Q	[J]	teplo
Q_H	[J]	přijaté nebo odevzdané teplo
q_i	[W·m ⁻²]	difuzní tepelný tok
R	[m ² ·K·W ⁻¹]	tepelný, elektrický odpor
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	plocha
S_i	[N]	součet vnějších sil
t	[s]	čas
T	[K]	teplota
ΔT	[K]	rozdíl teplot

U	[V]	elektrické napětí
U_{VST}	[V]	vstupní napětí zesilovače
U_{VYST}	[V]	výstupní napětí zesilovače
v_s	[m·s]	rychlost proudění látky
Z_Z	[Ω]	zatěžovací impedance zesilovače
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
$grad\vartheta$	[K·m ⁻¹]	gradient teploty
ν	[m ² ·s]	kinematická viskozita
α	[W·m ⁻² ·K]	součinitel přestupu tepla
ρ	[kg·m ³]	hustota
τ_{ij}	[-]	viskózní tenzor smykového tření
τ_{ij}^R	[Pa]	tenzor Reynoldsova napětí
μ	[N·s·m ⁻²]	dynamická viskozita
δ_{ij}	[-]	Kroneckerovy funkce
ε	[-]	emisivita
σ	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]	Stefanova-Boltzmanova konstanta
η	[%]	účinnost
MKO		metoda konečných objemů
FR4		materiál na výrobu desek plošných spojů
NTC		negativní termistor
FFT		rychlá Fourierova transformace
DPS		deska plošných spojů
DVD		digital video disc
CAD		počítačem podporované navrhování

Seznam obrázků

Obr. 1: Nastavení pracovního bodu u zesilovačů třídy AB	14
Obr. 2: Příklad aktivního chlazení	20
Obr. 3: Diagram jednotlivých kroků simulace v SolidWorks Flow Simulation [9]	23
Obr. 4: Blokové schéma navrženého zesilovače.	24
Obr. 5: Blokové schéma jednotlivých částí zesilovače The Leach Amp.....	26
Obr. 6: Schéma zapojení vstupního stupně.....	26
Obr. 7: Schéma zapojení druhého stupně	27
Obr. 8: Schéma zapojení výstupního a řídicího stupně	29
Obr. 9: Schéma zapojení zpětné vazby	30
Obr. 10: Schéma zapojení ochranného obvodu výkonového zesilovače Leach	30
Obr. 11: Sestavený výkonový zesilovač	32
Obr. 12: Schéma zapojení ochrany reproduktorů [18]	33
Obr. 13: Fotografie použitého analogového VU metru	35
Obr. 14: Schéma zapojení indikátoru vybuzení [20]	35
Obr. 15: Schéma zapojení regulátoru otáček ventilátoru [21]	36
Obr. 16: Blokové schéma jednotlivých částí napájecího zdroje	37
Obr. 17: Schéma zapojení soft startu, upraveno z [22].....	37
Obr. 18: Schéma zapojení modulu napájecího zdroje	38
Obr. 19: Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje.....	41
Obr. 20: Naměřená kmitočtová charakteristika výkonového zesilovače Leach	45
Obr. 21: Harmonické zkreslení THD v závislosti na frekvenci vstupního napětí	47
Obr. 22: Harmonické zkreslení THD v závislosti na výkonu dodávaného do zátěže	48
Obr. 23: Geometrický model zesilovače použitý ve finálním návrhu chlazení.....	49
Obr. 24: Geometrický model chladiče koncových tranzistorů	50
Obr. 25: Geometrický model DPS výkonového zesilovače	50
Obr. 26: Deska plošných spojů výkonového zesilovače vyfocená termokamerou.....	52
Obr. 27: Chladič koncových tranzistorů vyfocen termokamerou	52
Obr. 28: Model teplotního pole DPS výkonového zesilovače.....	53
Obr. 29: Model teplotního pole chladiče koncových tranzistorů.....	53
Obr. 30: P-V křivka použitých ventilátorů v zesilovači [24].....	55
Obr. 31: Výpočetní síť vytvořená při simulaci chlazení zesilovače	57
Obr. 32: Rozvržení teplot uvnitř zesilovače bez použití ventilátorů	58
Obr. 33: Proudění vzduchu uvnitř zesilovače bez použití ventilátoru	58
Obr. 34: Rozvržení teplot uvnitř zesilovače při použití jednoho ventilátoru.....	59
Obr. 35: Proudění uvnitř zesilovače při použití jednoho ventilátoru.....	60
Obr. 36: Rozvržení teplot uvnitř zesilovače při použití tří ventilátorů	61
Obr. 37: Proudění uvnitř zesilovače při použití tří ventilátorů	61
Obr. 38: Tepelné pole a proudění vzduchu ve výsledném návrhu chlazení	62
Obr. 39: Srovnání jednotlivých variant navrženého chlazení.....	63
Obr. 40: Fotografie zesilovače z průběhu jeho sestavování	64

Obr. 41: Rozmístění jednotlivých částí zesilovače ve spodní úrovni.	65
Obr. 42: Rozmístění jednotlivých částí zesilovače v horní úrovni.	65

Seznam tabulek

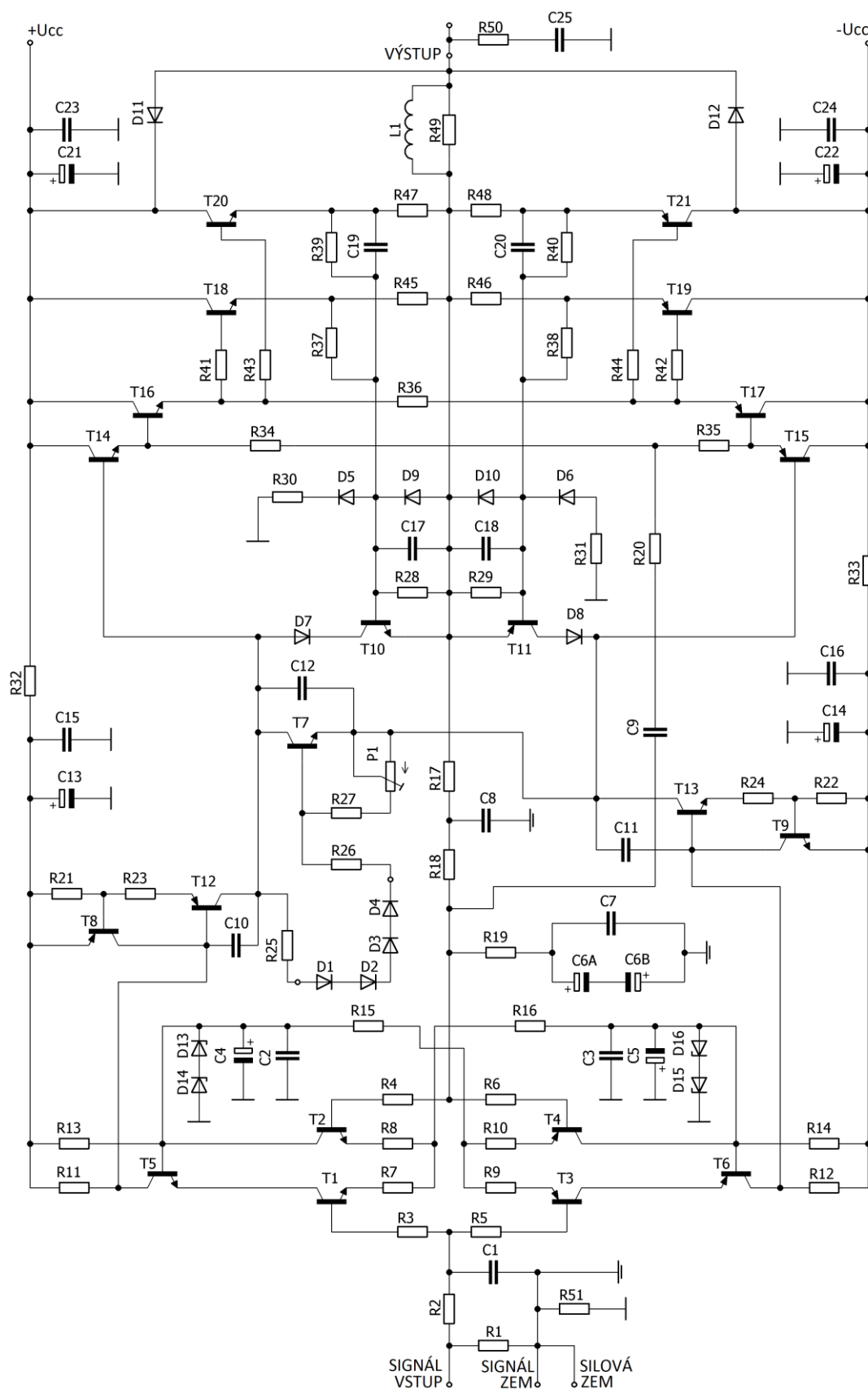
Tab. 1: Hodnoty výkonu, příkonu a účinnosti při zatěžovací impedanci 8 Ω	43
Tab. 2: Hodnoty výkonu, příkonu a účinnosti při zatěžovací impedanci 4 Ω	43
Tab. 3: Vypočtené hodnoty napětového zesílení výkonového zesilovače Leach	45
Tab. 4: Zkreslení THD výkonového zesilovače v závislosti na frekvenci	46
Tab. 5: Zkreslení THD výkonového zesilovače v závislosti na jeho výkonu.....	47
Tab. 6: Naměřená rychlost přeběhu výkonového zesilovače	48
Tab. 7: Tabulka ztrátových výkonů jednotlivých součástí.....	54
Tab. 8: Základní nastavení simulace.....	54
Tab. 9: Materiály jednotlivých komponent zesilovače	55
Tab. 10: Počet vygenerovaných buněk	56
Tab. 11: Přehled cen materiálu potřebného ke stavbě zesilovače	66

Seznam příloh

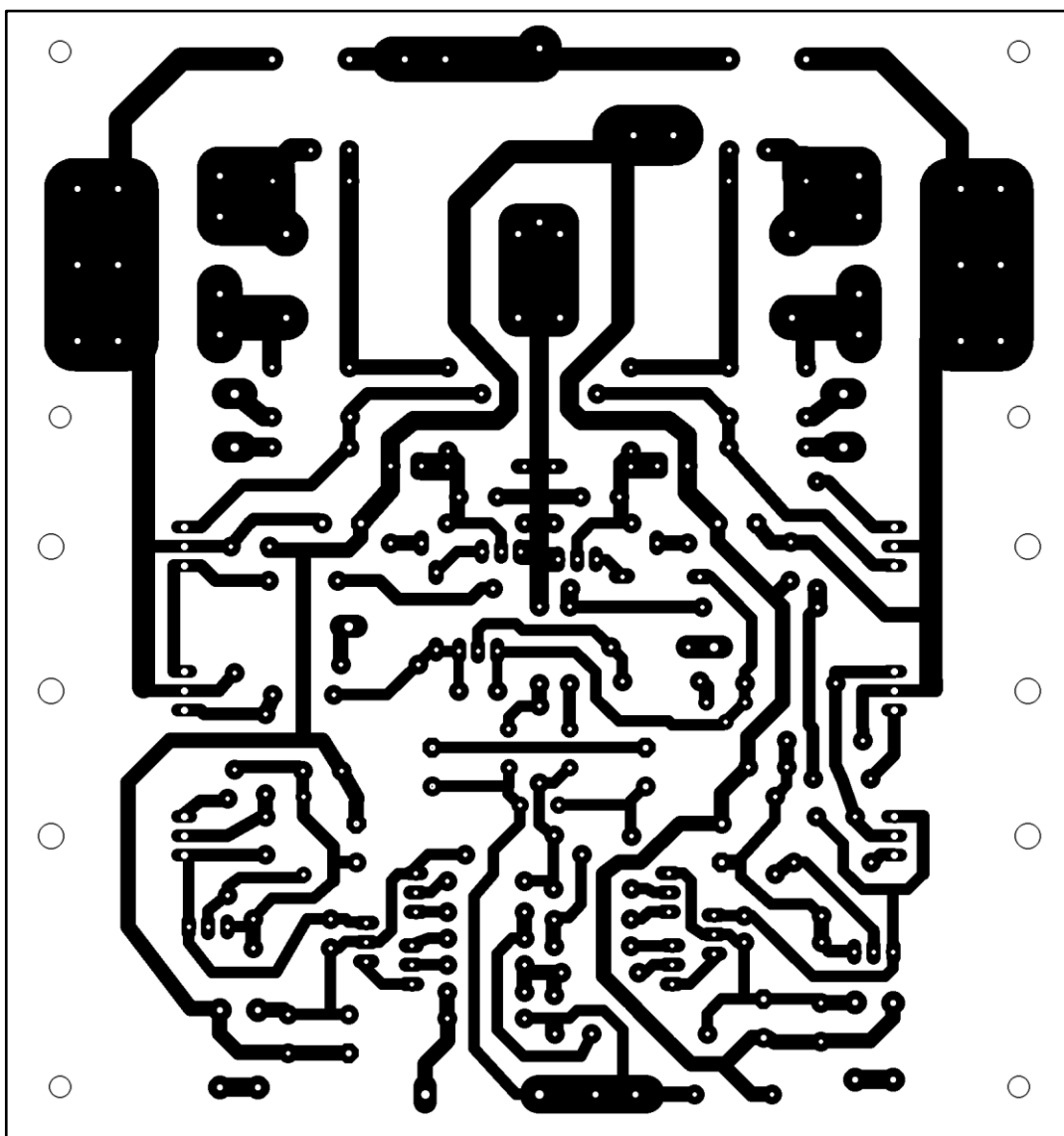
A Výkonový zesilovač Leach	78
A.1 Schéma zapojení výkonového zesilovače Leach	78
A.2 Deska plošných spojů	79
A.3 Osazovací výkres	80
A.4 Rozpiska použitých součástek	81
B Ochrana reproduktorů	83
B.1 Deska plošných spojů	83
B.2 Osazovací výkres	83
B.3 Rozpiska použitých součástek	83
C Indikátor vybuzení	84
C.1 Deska plošných spojů	84
C.2 Osazovací výkres	84
C.3 Rozpiska použitých součástek	85
D Řízení ventilátoru	85
D.1 Deska plošných spojů	85
D.2 Osazovací výkres	85
D.3 Rozpiska použitých součástek	86
E Napájecí zdroj	86
E.1 Plošný spoj soft startu	86
E.2 Osazovací výkres soft startu	86
E.3 Rozpiska součástek soft startu	87
E.4 Plošný spoj modulu napájecího zdroje	87
E.5 Osazovací výkres modulu napájecího zdroje	87
E.6 Rozpiska součástek modulu napájecího zdroje	88
F Pomocný napájecí zdroj	88
F.1 Plošný spoj	88
F.2 Osazovací výkres	88
F.3 Rozpiska použitých součástek	89

A Výkonový zesilovač Leach

A.1 Schéma zapojení výkonového zesilovače Leach

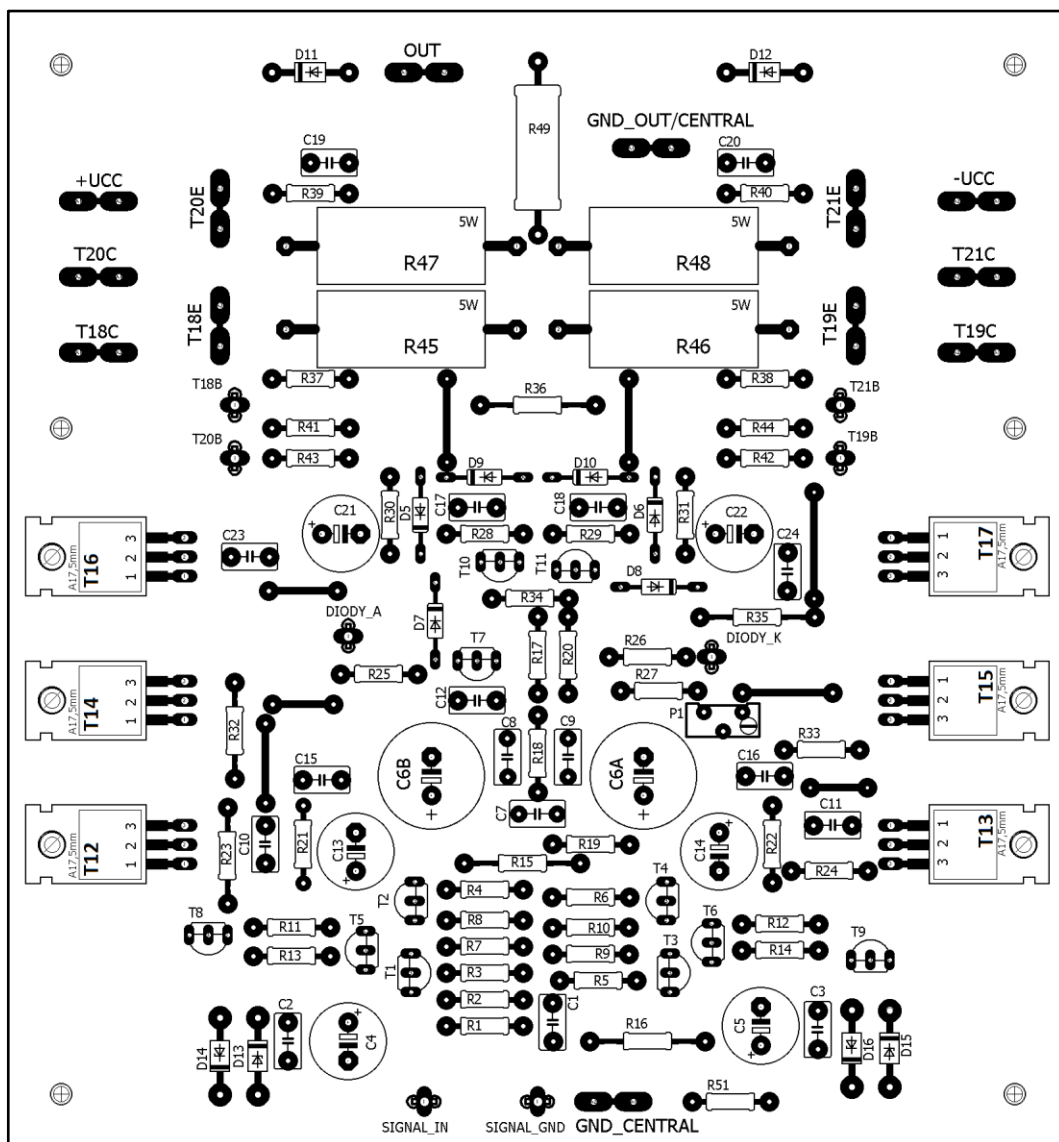


A.2 Deska plošných spojů



Rozměry desky plošných spojů jsou 140 x 150 [mm], uvedeno v měřítku M1:1.

A.3 Osazovací výkres



Cívka L1, viz schéma zapojení výkonového zesilovače Leach v příloze A.1, která na osazovacím výkresu není vyobrazena, je namotaná měděným drátem o průměru 1 mm s izolačním lakem, 11 závitů kolem rezistoru R49 a připojena k jeho vývodům.

A.4 Rozpiska použitých součástek

Rezistory

Pokud není v poznámce uvedeno jinak, byly použity 0,6 W metalizované rezistory v pouzdře 0207, s tolerancí 1 %.

Označení ve schématu	Hodnota	Poznámka
R1	20 k Ω	
R2	2 k Ω	
R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	300 Ω	
R11, R12, R27	1,2 k Ω	
R13, R14	2,2 k Ω	
R15, R16	12 k Ω	
R17, R18	11 k Ω	
R19	1,1 k Ω	
R20	22 k Ω	
R21, R22	30 Ω	
R23, R24	360 Ω	
R25, R26	1 k Ω	
R28, R29	270 Ω	
R30, R31	3,9 k Ω	
R32, R33, R51	82 Ω	
R34, R35	330 Ω	
R36	220 Ω	
R37, R38, R39, R40	680 Ω	
R41, R42, R43, R44	10 Ω	
R45, R46, R47, R48	0,33 Ω	5 W drátový, tol. 5%
R49, R50	10 Ω	3 W drátový, tol. 5%

Kondenzátory

Všechny kondenzátory jsou použity s roztečí vývodů 5 mm, kromě kondenzátoru C25, který má rozteč vývodů 10 mm, z důvodů snadnějšího pájení k výstupním svorkám zesilovače.

Označení ve schématu	Hodnota	Poznámka
C1	390 pF	Keramický
C2, C3, C15, C16, C23, C24, C25	100 nF / 100 V	Fóliový
C7, C12, C17, C18	100 nF / 100 V	Fóliový
C4, C5, C13, C14, C21, C22	100 μ F / 63 V	Elektrolytický
C6A, C6B	330 μ F / 63 V	Elektrolytický
C8	180 pF	Keramický
C9	47 pF	Keramický
C10, C11	10 pF	Keramický
C19, C20	10 nF / 100 V	Fóliový

Diody

Označení ve schématu	Typ	Poznámka
D1, D2, D3, D4, D11, D12	1N4007	
D5, D6, D7, D8, D9, D10	1N4148	
D13, D14, D15, D16	BZX85V020	20 V Zenerova dioda , 0,8 W

Tranzistory

Označení ve schématu	Typ	Poznámka
T1, T2, T5, T7, T9, T10	MPSA06	NPN Tranzistor
T3, T4, T6, T8, T11	MPSA56	PNP Tranzistor
T13, T14, T16	MJE15032	NPN Tranzistor
T12, T15, T17	MJE15033	PNP Tranzistor
T18, T20	MJ15003	NPN Tranzistor
T19, T21	MJ15004	PNP Tranzistor

Ostatní součástky

Označení ve schématu	Součástka
+UCC, -UCC, OUT,	Konektor Faston do DPS, FVP 6,3 x 0,8 mm
GND/OUT_CENTRAL	Konektor Faston do DPS, FVP 6,3 x 0,8 mm
GND_CENTRAL	Konektor Faston do DPS, FVP 6,3 x 0,8 mm
T18C, T19C, T20C, T21C	Konektor Faston do DPS, FVP 6,3 x 0,8 mm
T18E, T19E, T20E, T21E	Konektor Faston do DPS, FVP 6,3 x 0,8 mm
SIGNAL_IN, SIGNAL_OUT	Konektor Faston do DPS, FVP 2,8 x 0,8 mm
DIODY_A, DIODY_K	Konektor Faston do DPS, FVP 2,8 x 0,8 mm
T18B, T19B, T20B, T21B	Konektor Faston do DPS, FVP 2,8 x 0,8 mm
P1	Trimr víceotáčkový, 64Y2K, 2 k Ω , 0,5 W
L1	10 – 12 závitů drátu 1 mm

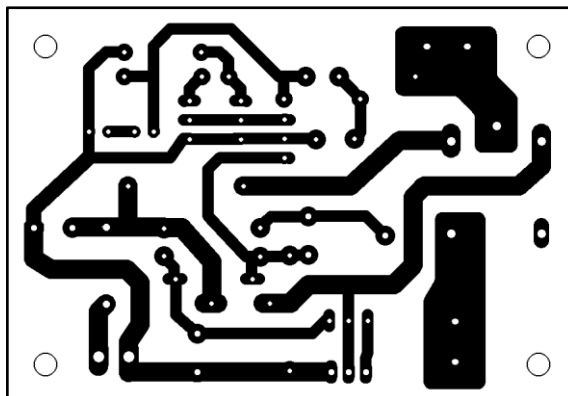
Pro chlazení tranzistorů MJE15032 a MJE15033 bylo použito celkem 6 kusů hliníkových chladičů DO2A určených pro pouzdro TO220 těchto tranzistorů.

Cívka L1 je namotaná měděným drátem o průměru 1 mm s izolačním lakem, 11 závitů kolem rezistoru R49.

Dále bylo použito 8 kusů propojek viz osazovací výkres v příloze A.3.

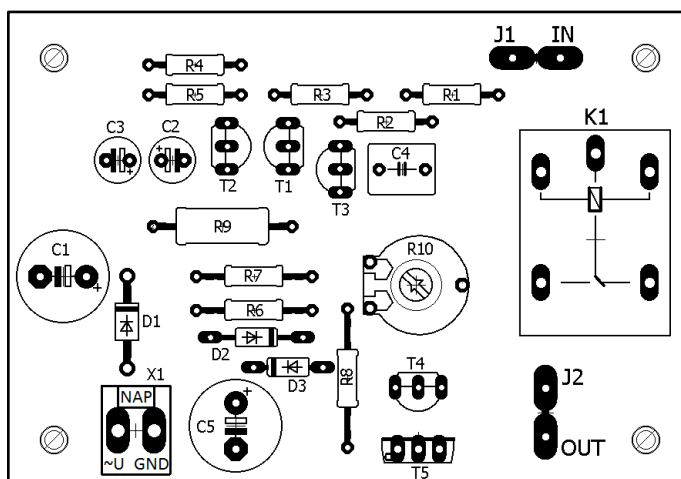
B Ochrana reproduktorů

B.1 Deska plošných spojů



Rozměry desky plošných spojů jsou 75 x 52 [mm], uvedeno v měřítku M1:1.

B.2 Osazovací výkres



B.3 Rozpiska použitých součástek

Rezistory, kondenzátory

Označení ve schématu	Hodnota	Poznámka
R1	22 k Ω	
R2	27 k Ω	
R3	560 Ω	
R4, R5	5,6 k Ω	
R6	39 k Ω	
R7	10 k Ω	
R8	1,8 k Ω	
R9	1 k Ω	1 W, drátový
R10	22 k Ω	Trimr
C1, C5	100 μ F / 63 V	Elektrolytický
C2, C3	22 μ F / 63 V	Elektrolytický
C4	1 μ F / 100 V	Fóliový

Tranzistory, diody

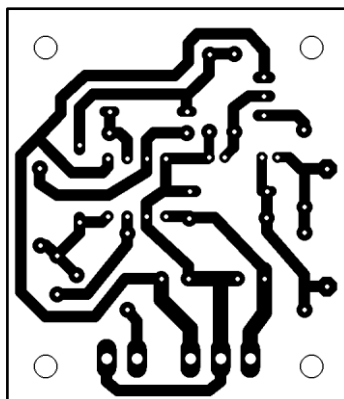
Označení ve schématu	Typ	Poznámka
T1, T2, T4	BC639	NPN Tranzistor
T4	BC640	PNP Tranzistor
T5	BD139	NPN Tranzistor
D1	1N4007	
D2, D3	1N4148	

Ostatní součástky

Označení ve schématu	Typ	Poznámka
K1	RELAS2415	Relé
J1, J2	Konektor Faston do DPS	FVP 6,3 x 0,8 mm
X1	PSH04-02P	Konektor

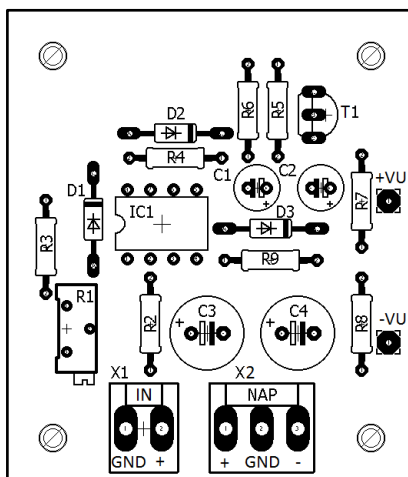
C Indikátor vybuzení

C.1 Deska plošných spojů



Rozměry desky plošných spojů jsou 45 x 52 [mm], uvedeno v měřítku M1:1.

C.2 Osazovací výkres

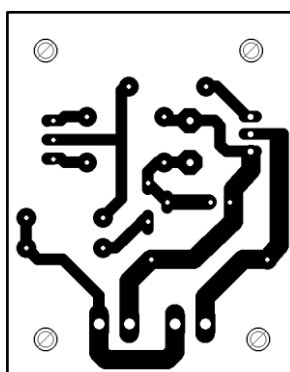


C.3 Rozpiska použitých součástek

Označení ve schématu	Hodnota / Typ	Poznámka
R1	100 k Ω	Trimr
R2	10 k Ω	
R3, R4	100 k Ω	
R5	100 Ω	
R6	1 M Ω	
R7, R9	4,7 k Ω	
R8	220 Ω	
C1, C2	10 μ F / 35 V	Elektrolytický
C3, C4	100 μ F / 50 V	Elektrolytický
D1, D2	BAT43	
D3	1N4148	
T1	BC550	NPN Tranzistor
LM1458N		
X1	PSH04-02P	Konektor
X2	PSH04-03PG	Konektor

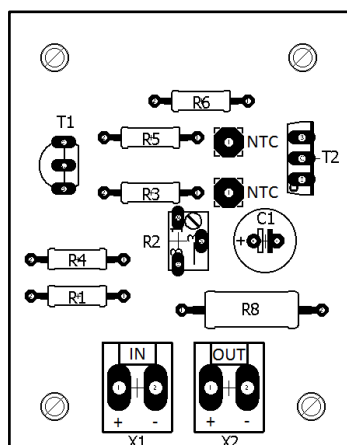
D Řízení ventilátoru

D.1 Deska plošných spojů



Rozměry desky plošných spojů jsou 38 x 48 [mm], uvedeno v měřítku M1:1.

D.2 Osazovací výkres

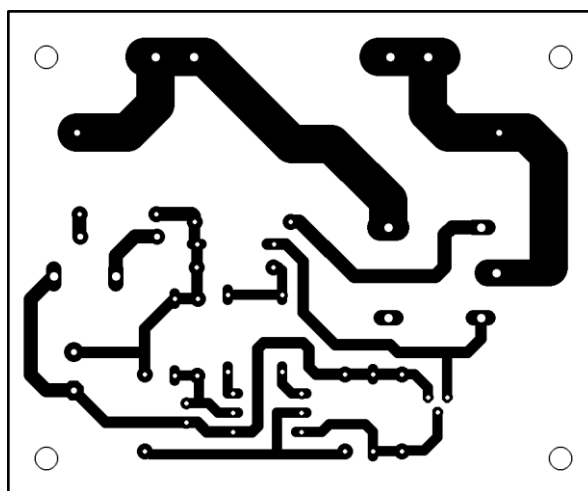


D.3 Rozpiska použitých součástek

Označení ve schématu	Hodnota / Typ	Poznámka
R1	15 k Ω	
R2	50 k Ω	Trimr
R3	100 k Ω	
R4	5,6 k Ω	
R5	330 Ω	
R6	4,7 k Ω	
R7	10 k Ω	NTC termistor
R8	180 Ω	3 W, drátový
C1	50 μ F / 25 V	Elektrolytický
T1	BC639	NPN Tranzistor
T2	BD139	NPN Tranzistor
X1, X2	PSH04-02P	Konektor

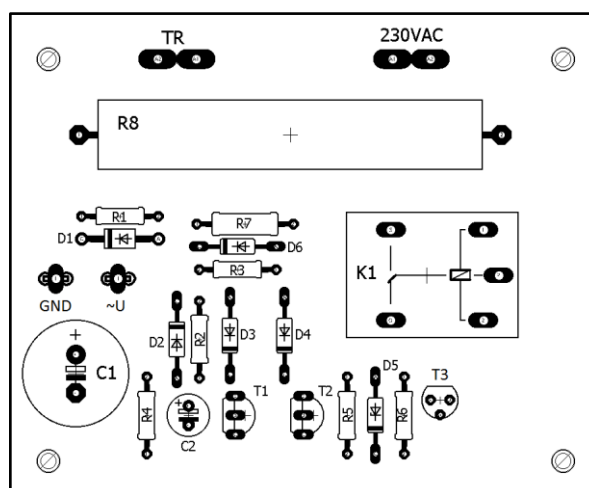
E Napájecí zdroj

E.1 Plošný spoj soft startu



Rozměry desky plošných spojů jsou 78 x 64 [mm], uvedeno v měřítku M1:1.

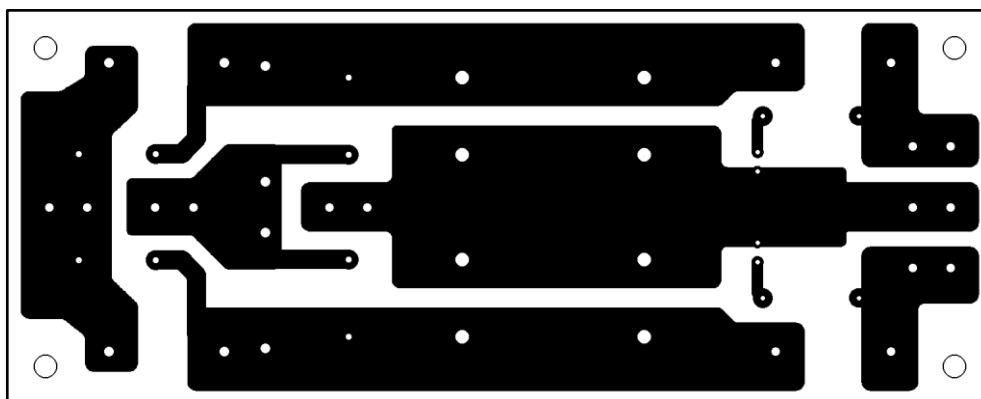
E.2 Osazovací výkres soft startu



E.3 Rozpiska součástek soft startu

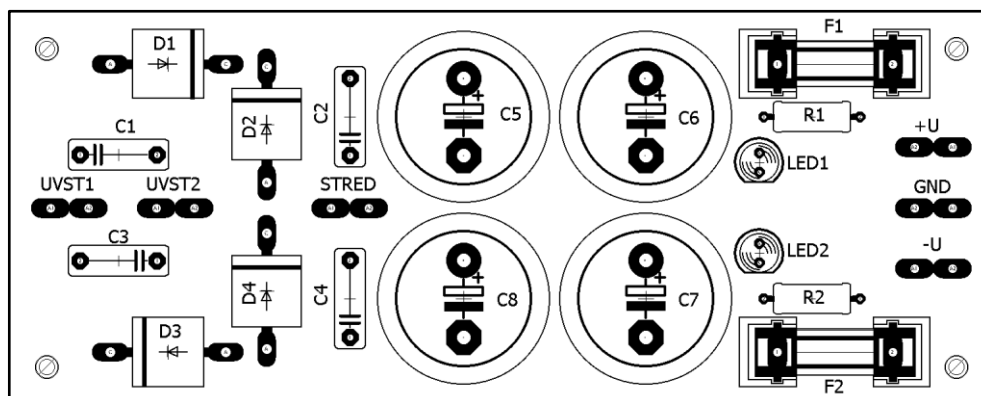
Označení ve schématu	Hodnota / Typ	Poznámka
R1	330 Ω	
R2, R3, R4	100 k Ω	
R5	220 k Ω	
R6	1 M Ω	
R7	820 Ω	1 W
R8	33 Ω	10 W, drátový
C1	100 μ F / 63 V	Elektrolytický
C2	10 μ F / 63 V	Elektrolytický
D1	1N4007	
D2, D3, D4, D6	1N4148	
D5	BZX55/10V	10 V Zenerova dioda
T1, T2	BC556B	
T3	BS170	
K1	RELRAS2415	
~U, ZEM	Faston do DPS	FVP 2,8 x 0,8 mm
230VAC, TR	Faston do DPS	FVP 6,3 x 0,8 mm

E.4 Plošný spoj modulu napájecího zdroje



Rozměry desky plošných spojů jsou 130 x 52 [mm], uvedeno v měřítku M1:1.

E.5 Osazovací výkres modulu napájecího zdroje

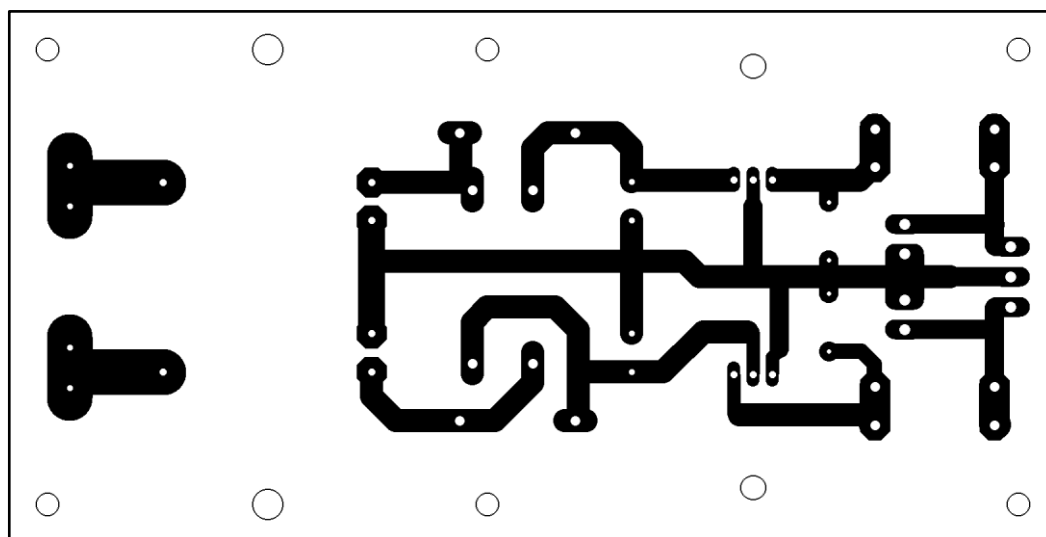


E.6 Rozpiska součástek modulu napájecího zdroje

Označení ve schématu	Hodnota / Typ	Poznámka
R1, R2	1,5 k	2 W
C1, C2, C3, C4	47 nF / 250 V	Fóliový
C5, C6, C7, C8	4700 μ F / 50 V	Elektrolytický
D1, D2, D3, D4	P1000K	
LED1, LED2		LED 5 mm, modrá
F1, F2	PTF15B	Pojistka 5 A
~U, ~U, ZEM	Faston do DPS	FVP 6,3 x 0,8 mm
+U _{CC} , -U _{CC} , ZEM	Faston do DPS	FVP 6,3 x 0,8 mm

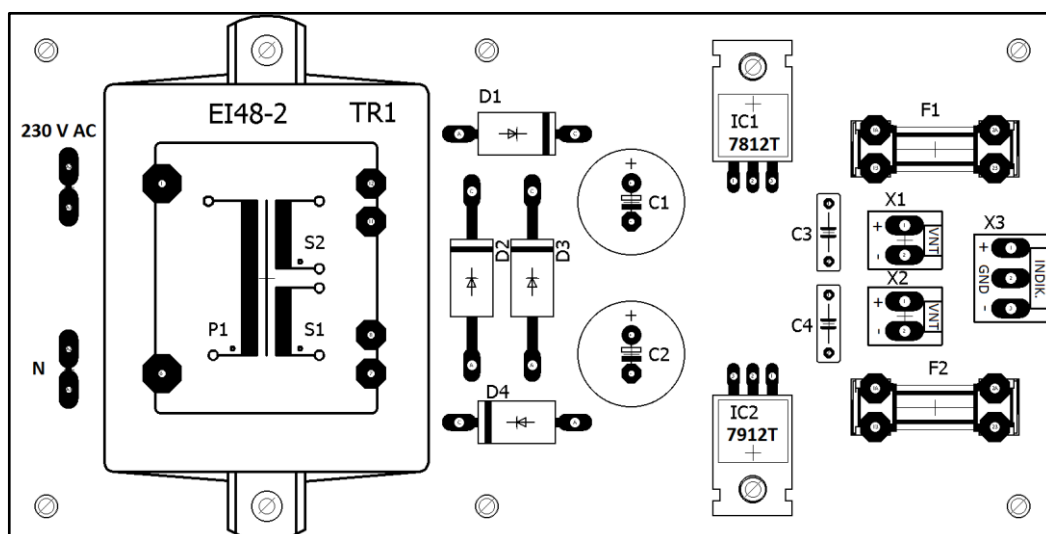
F Pomocný napájecí zdroj

F.1 Plošný spoj



Rozměry desky plošných spojů jsou 138 x 70 [mm], uvedeno v měřítku M1:1.

F.2 Osazovací výkres



F.3 Rozpiska použitých součástek

Označení ve schématu	Hodnota / Typ	Poznámka
C1, C2	1000 μ F / 35 V	Elektrolytický
C3, C4	100 nF / 100 V	Fóliový
D1, D2, D3, D4	1N5408	
IC1	7812T	Napět'ový stabilizátor
IC2	7912T	Napět'ový stabilizátor
TR1	BV EL 481 1119	Transformátor (2x 12V)
X1, X2	PSH04-02P	Konektor
X3	PSH04-03PG	Konektor
F1, F2	PTF15B	Pojistka 400 mA
230VAC,N	Faston do DPS	FVP 6,3 x 0,8 mm

Pro chlazení stabilizátorů 7812T a 7912T byly použity 2 kusy hliníkových chladičů DO2A určených pro pouzdro TO220.